

宇宙論はどこまでわかったか、 そしてこれからの宇宙論

小松英一郎

テキサス大学オースティン校, テキサス宇宙論センター

IPMU (数物連携宇宙研究機構)

物理学教室コロキウム, 東京大学, 2009年7月3日



宇宙論とは？

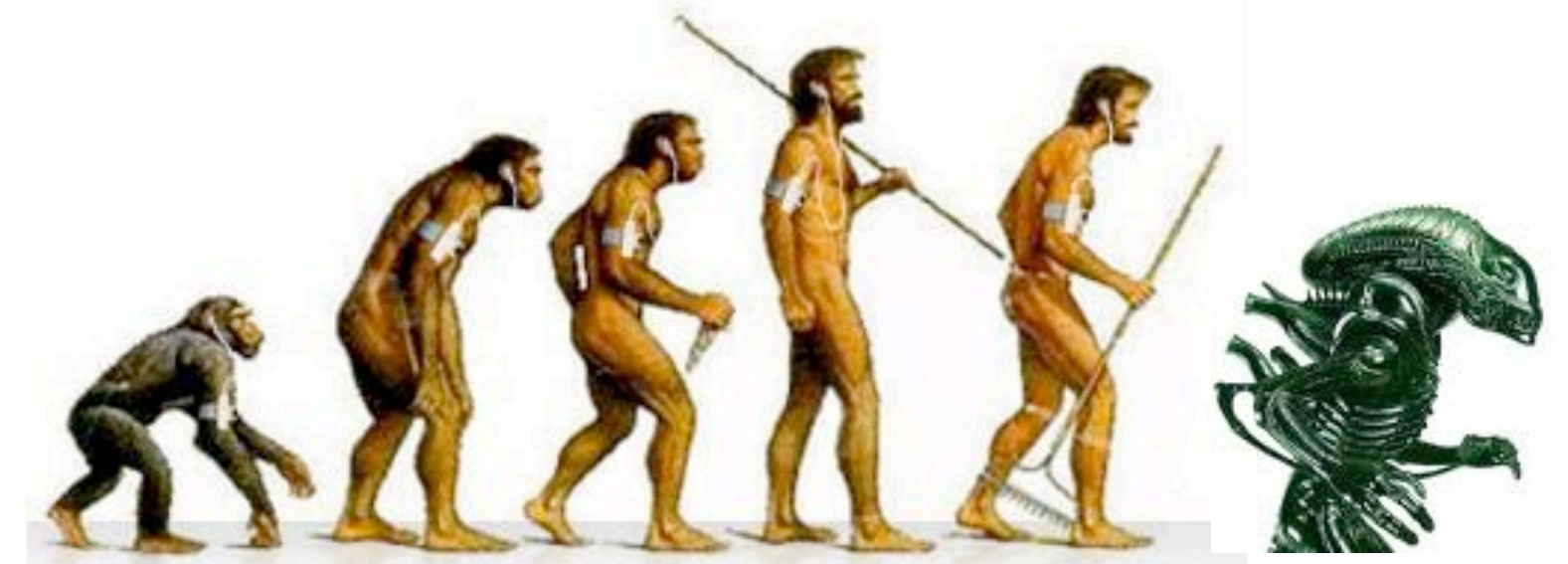
• 宇宙の起源

- 宇宙はどうやって始まったのか？
- 産まれたたての宇宙はどんな状態だった？



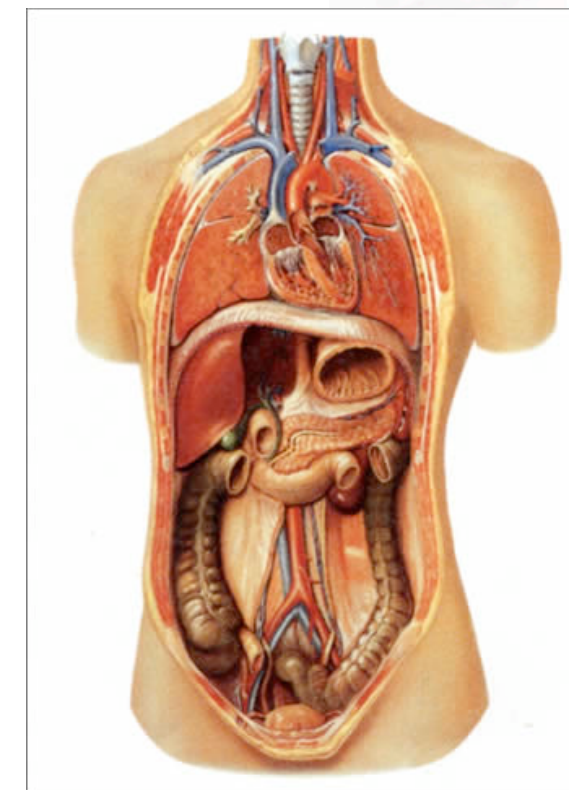
• 宇宙の歴史

- 宇宙は何歳？
- 幼少期、青年期、壮年期、晩期(?)の宇宙の状態は？



• 宇宙の組成

- 宇宙は何からできているのか？
- 物質やエネルギーの起源は？



確かな観測事実

- **宇宙は膨張している！**

- 1929年、エドウィン・ハッブル

- **昔の宇宙は熱かった！（ビッグバン理論の証明）**

- 1965年、アーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソン
- 1990年、宇宙背景放射探査機（COBE）チーム

- **初期宇宙は揺らいでいた！**

- 1992年、宇宙背景放射探査機（COBE）チーム

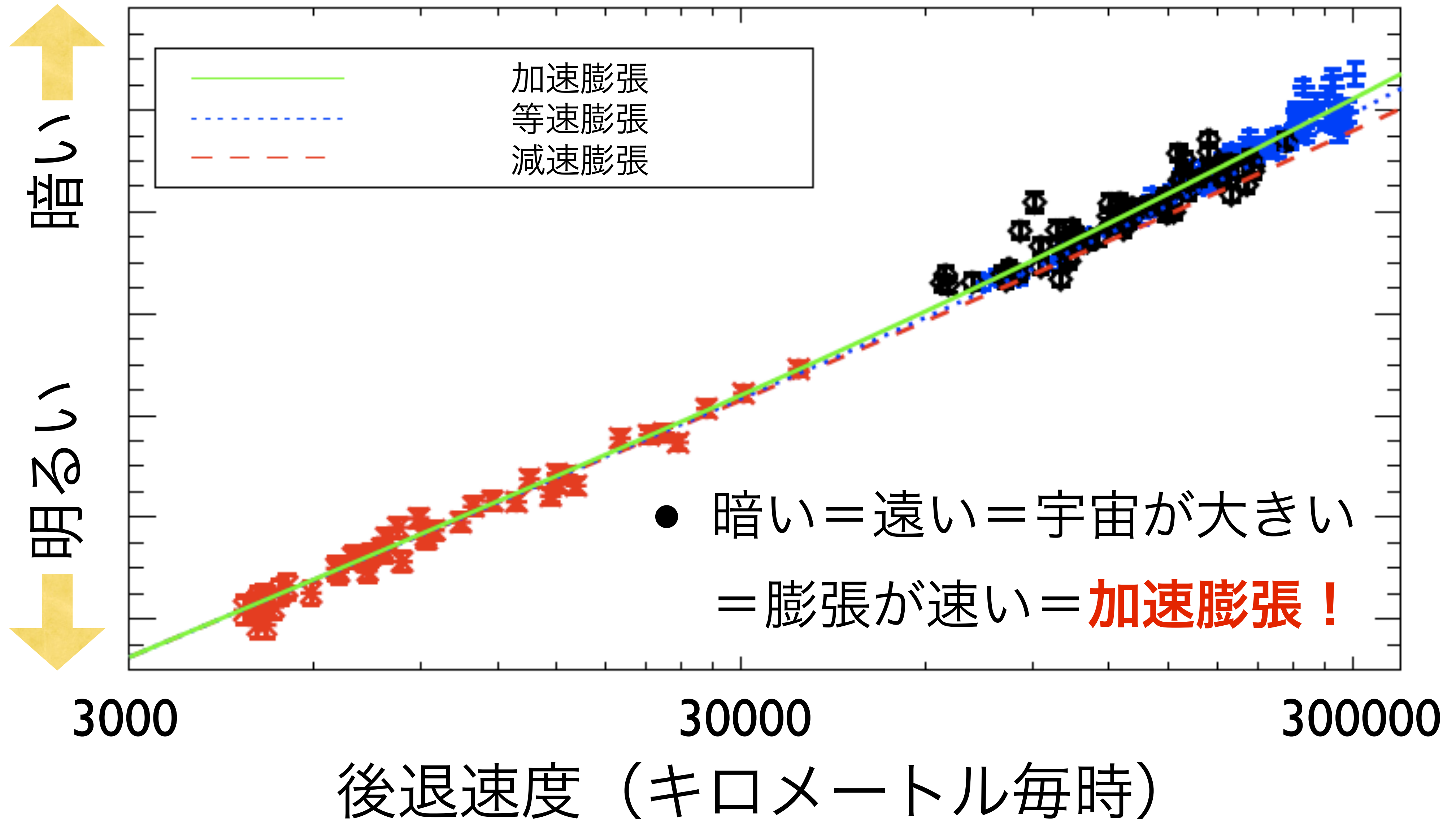


From "Cosmic Voyage"

驚愕の観測事実

- 現在の宇宙は**加速**膨張している！
 - 1998年、超新星宇宙論プロジェクトチーム
 - 1998年、高赤方偏移超新星探査チーム
 - 2003年、ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) チーム

超新星が思ったより暗く見えた



物質と宇宙膨張

- 物質のない、空っぽの宇宙はどのように膨張する？

—答：膨らむ速度が一定のまま膨張する。

- 物質のある宇宙はどのように膨張する？

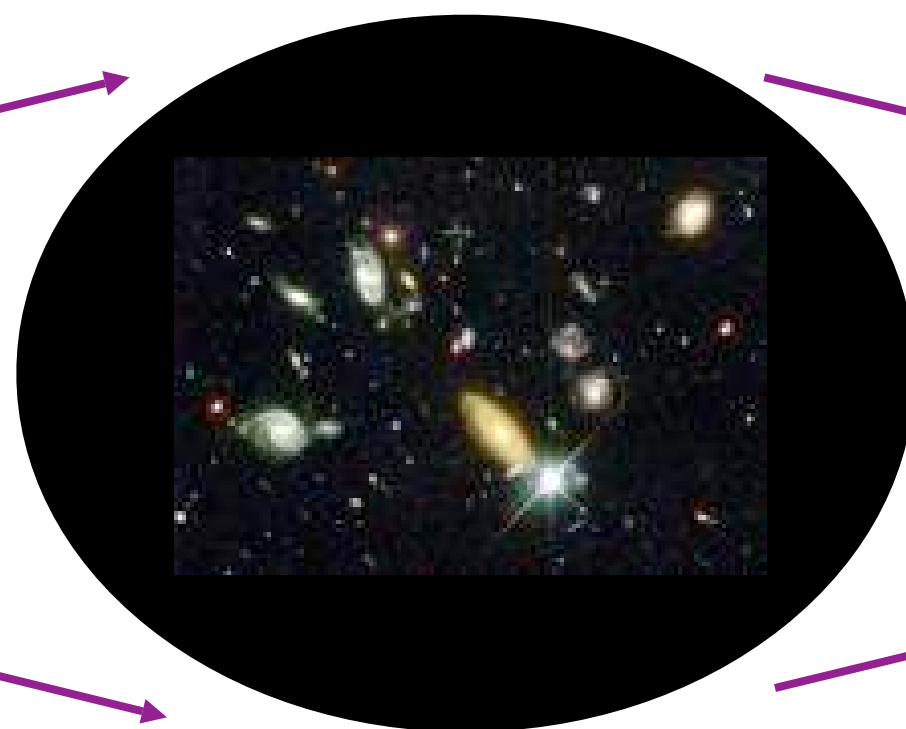
—答：物質の重力に引っ張られ、速度はだんだん遅くなる。

- 物質のありすぎる宇宙は、いずれつぶれてしまう。

—火の玉宇宙に逆戻り！

ビッグバン

Big Bang



ビッグクラッシュ

Big Crunch

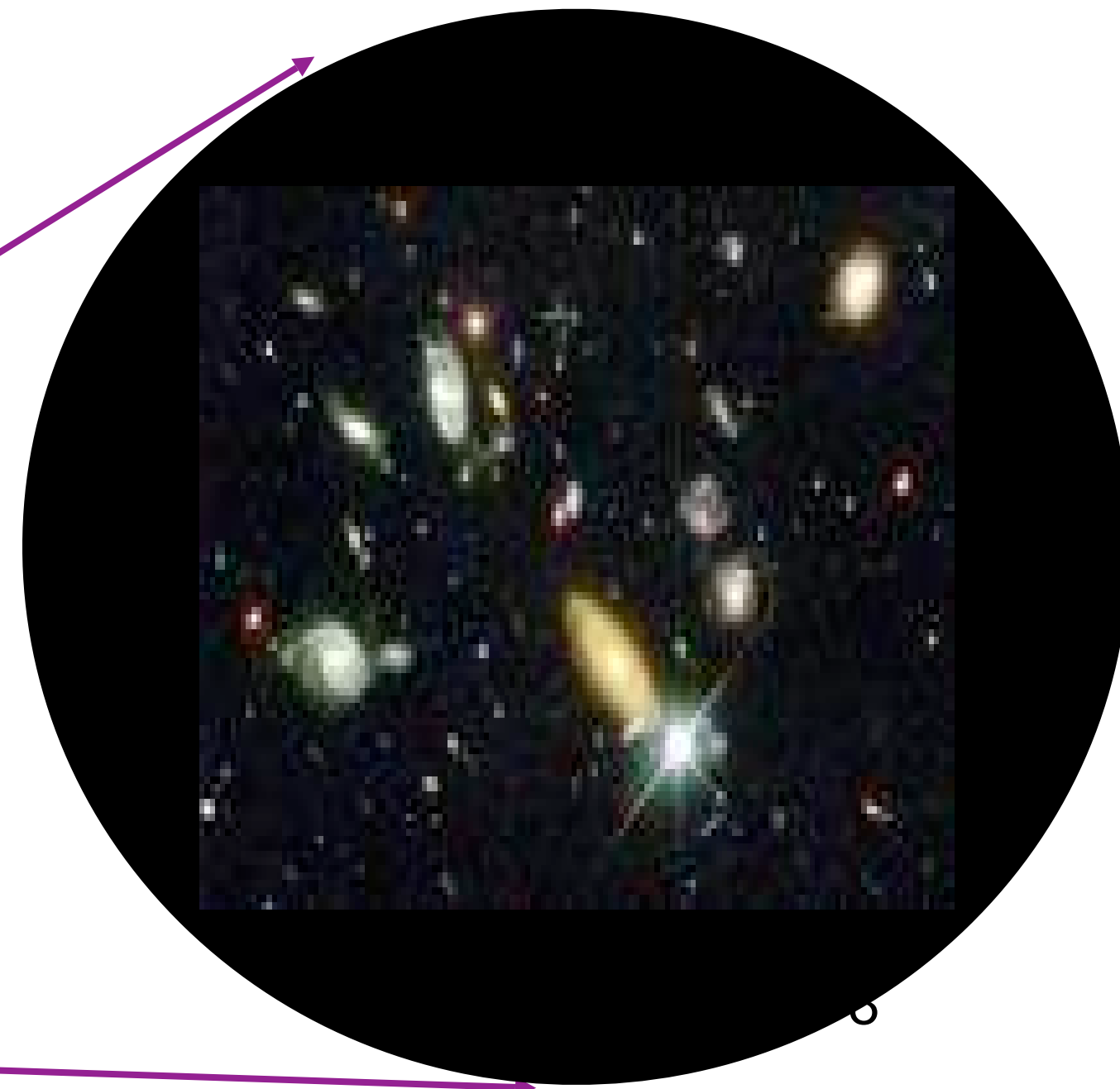
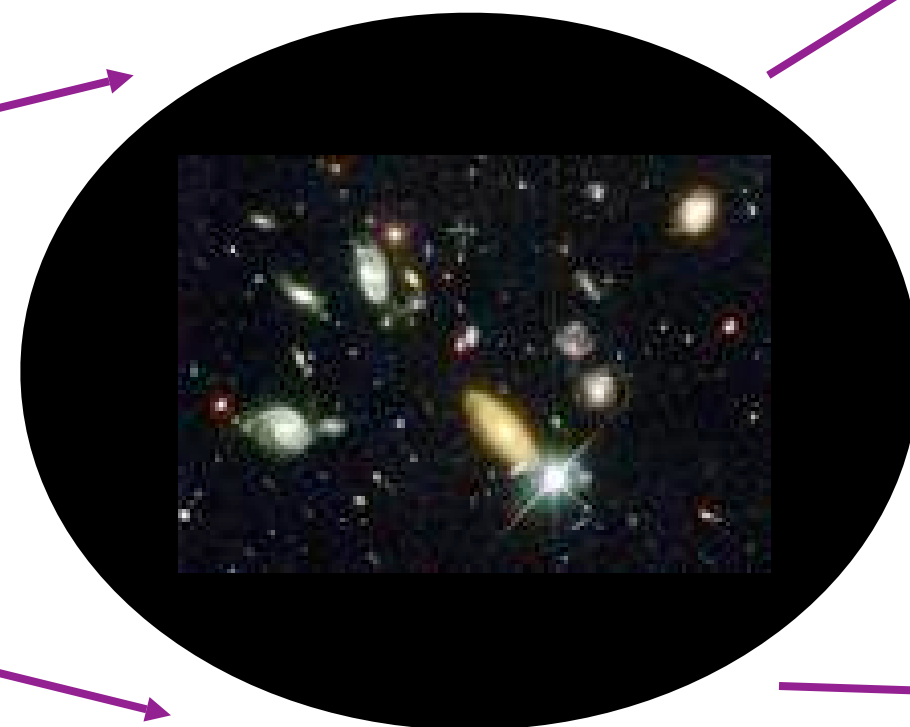


加速膨張する宇宙

- 物質のある宇宙はどのように膨張する？
 - 答**: 物質の重力に引っ張られ、速さはだんだん遅くなる。
- しかし、観測は宇宙膨張がどんどん速くなっていると示している。
 - その原因は、物質ではあり得ない。
 - “暗黒エネルギー”**の存在？

ビッグバン

Big Bang



驚愕の観測事実？

● ビッグバン以前の宇宙も **加速**膨張していた？

- 2008年、ウィルキンソンマイクロ波異方性探査機 (WMAP) チーム

Breakthrough of the Year (1998)

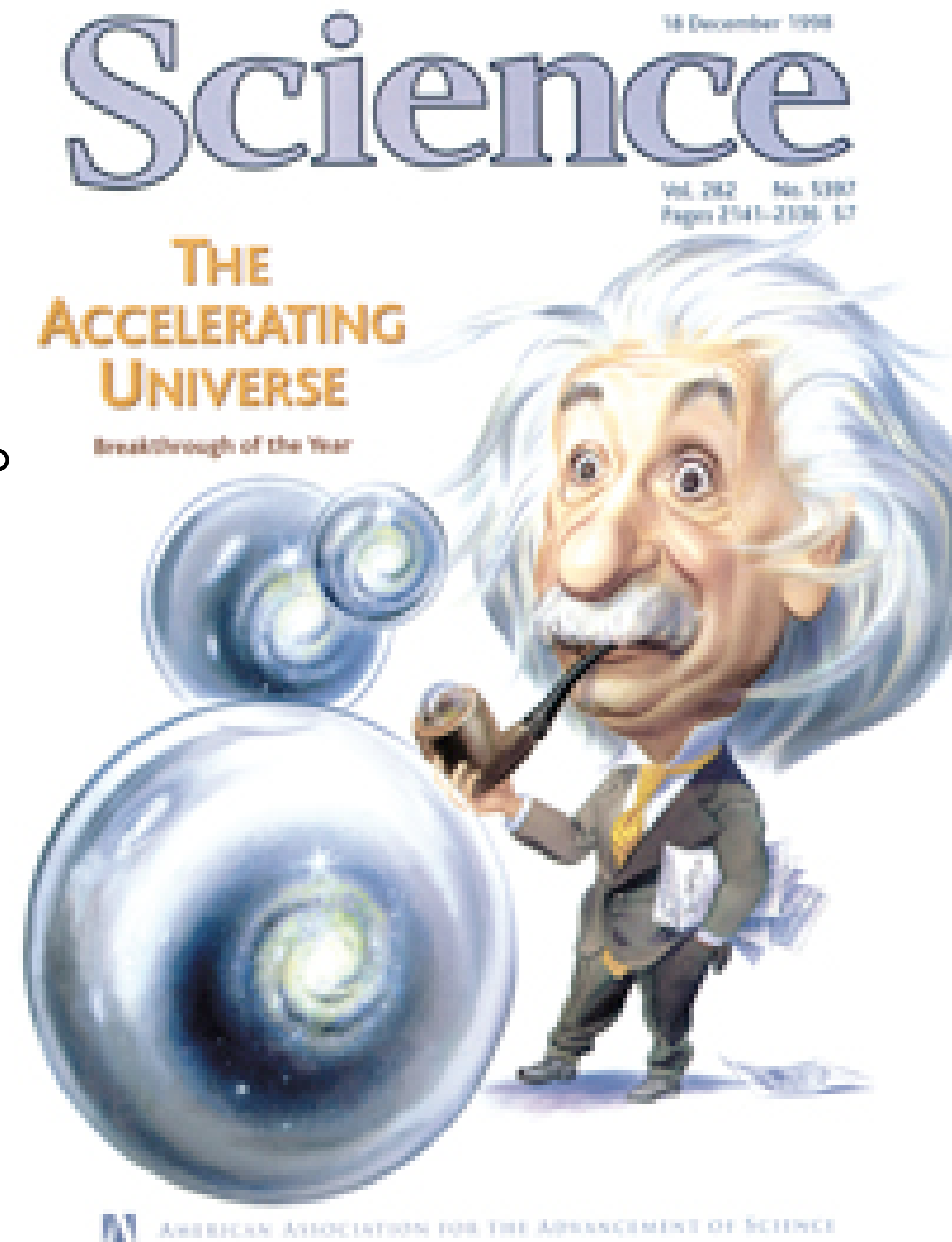
- ***The Accelerating Universe***

- 「加速膨張する宇宙」

- 暗黒エネルギーの発見は、1998年、アメリカの2つの研究グループによって独立になされた。

- 超新星を用いた膨張速度の測定

- その後、様々な他の手法で確認

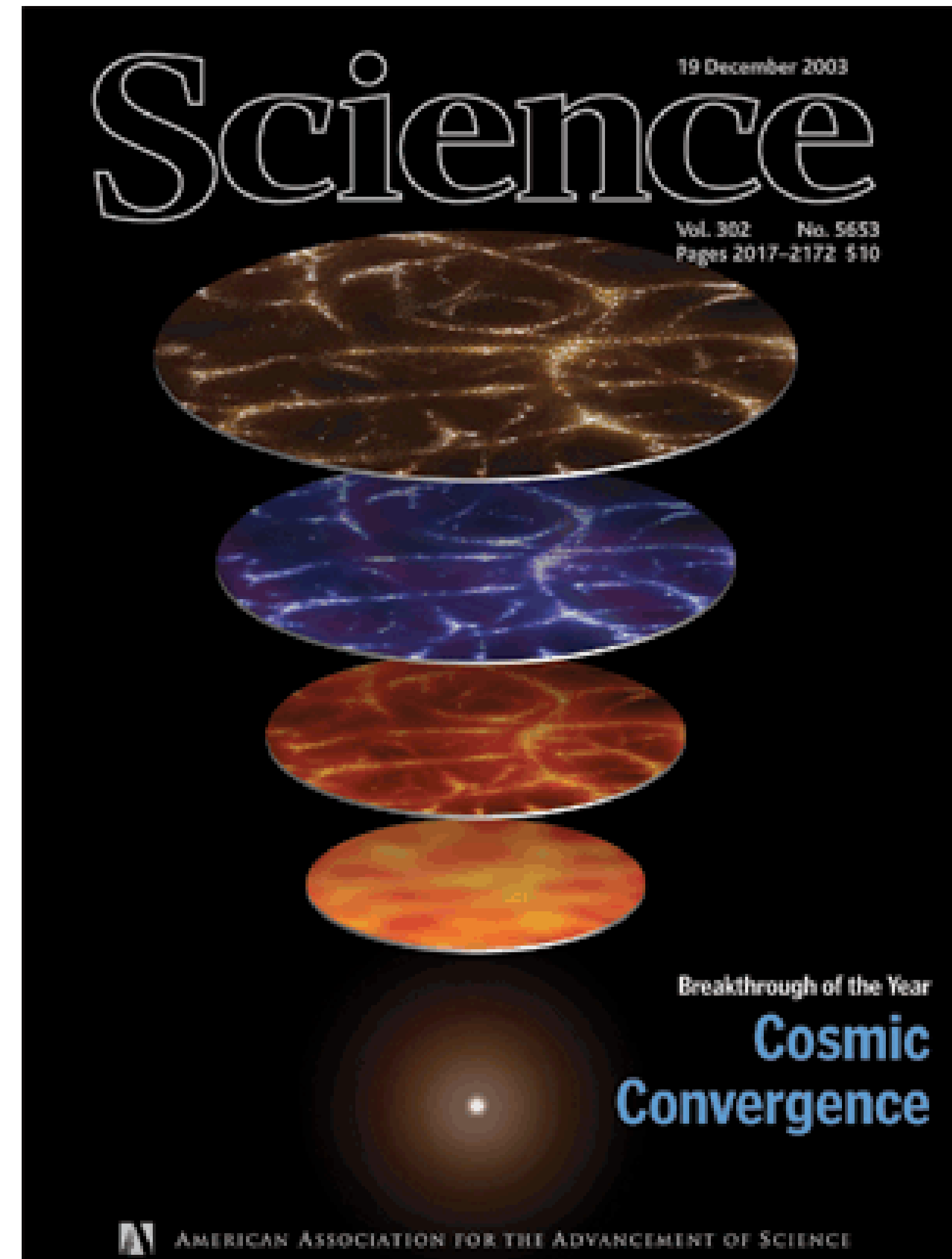


Breakthrough of the Year (2003)

- **Cosmic Convergence**

—「宇宙論の収束」

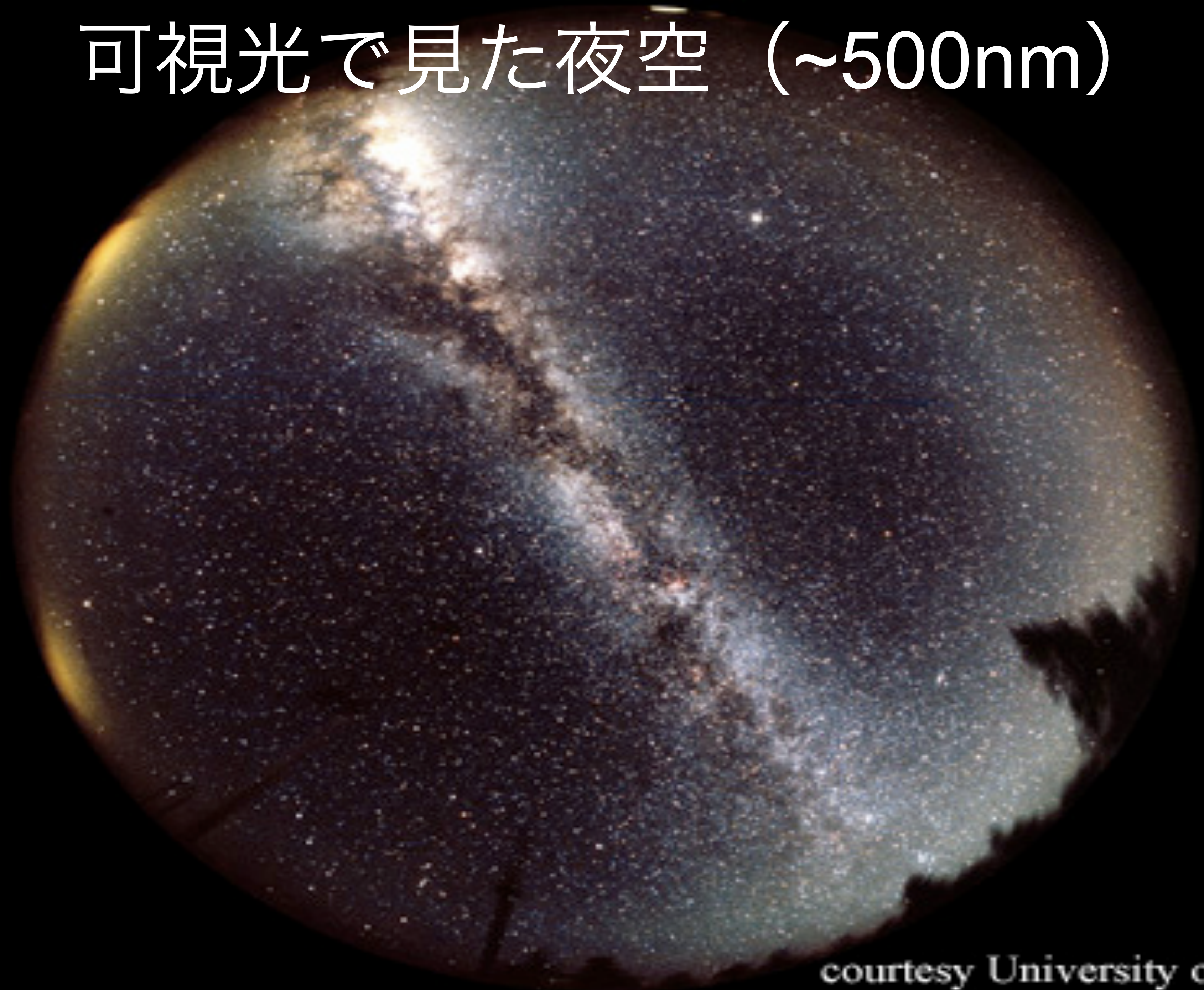
- 2003年、宇宙創成から現在に至るまでの、宇宙の歴史の統一的な理解が飛躍的に進んだ。
- WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測が重要な役割を果たした。



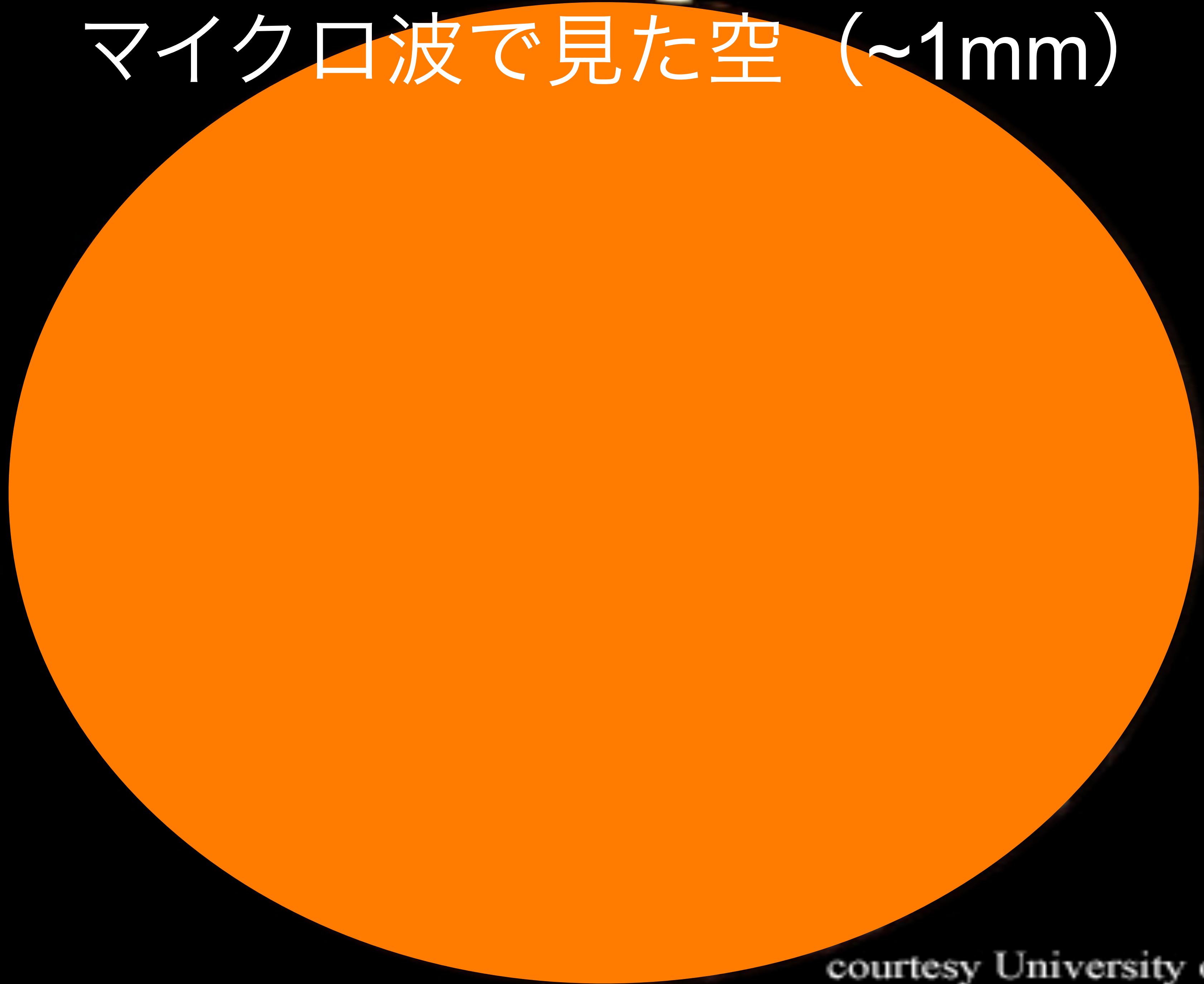
宇宙論の黄金時代

- 現在、我々は**宇宙論の黄金時代 (Golden Age of Cosmology)**にいる、と良く言われている。
- なぜ黄金時代か？
 - 大きな壁、大きなチャレンジが立ちふさがっている。非常にエキサイティングな状況
 - まれに見る理論と観測・実験の有機的つながり
- 今、宇宙論が熱い！

可視光で見た夜空 (~500nm)



マイクロ波で見た空 (~1mm)



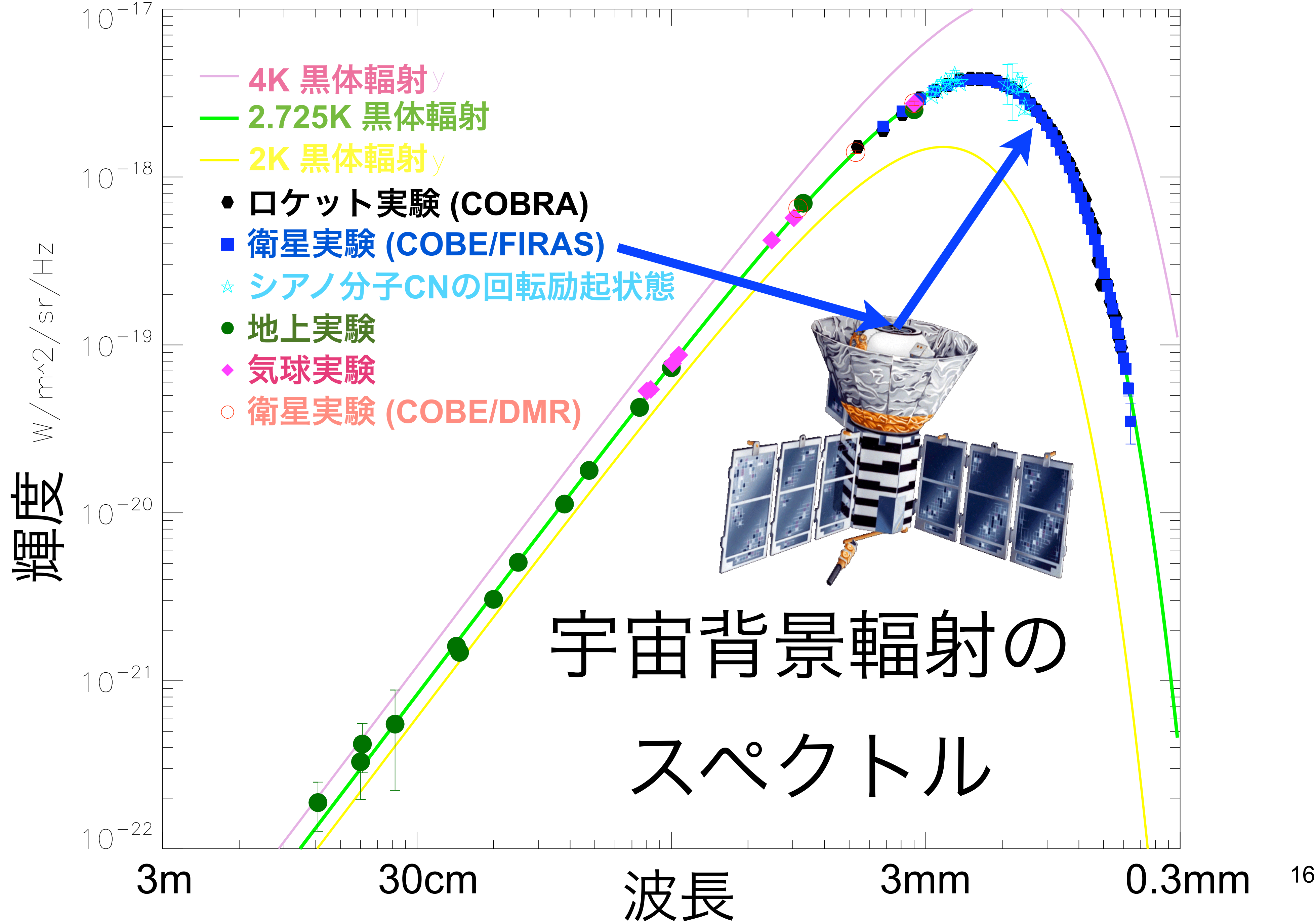
マイクロ波で見た空 (~1mm)

宇宙を一様に埋め尽くす

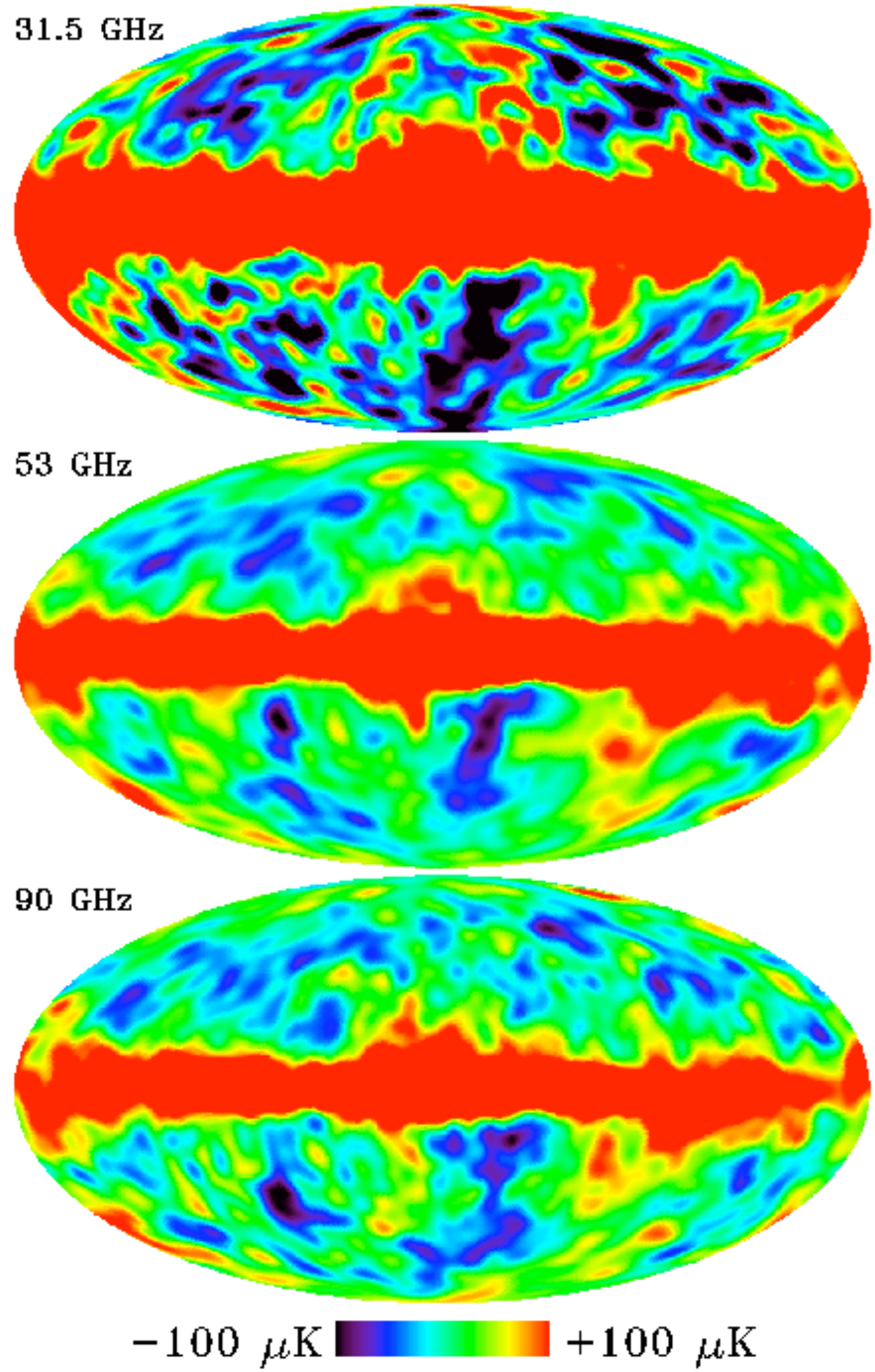
ビッグバンの残光

宇宙マイクロ波背景輻射

$T = 2.725 \text{ K}$



COBE/DMR, 1992



2.7Kの等方成分に加え、30uKの揺らぎ(1/100,000)が発見された。



COBE to WMAP

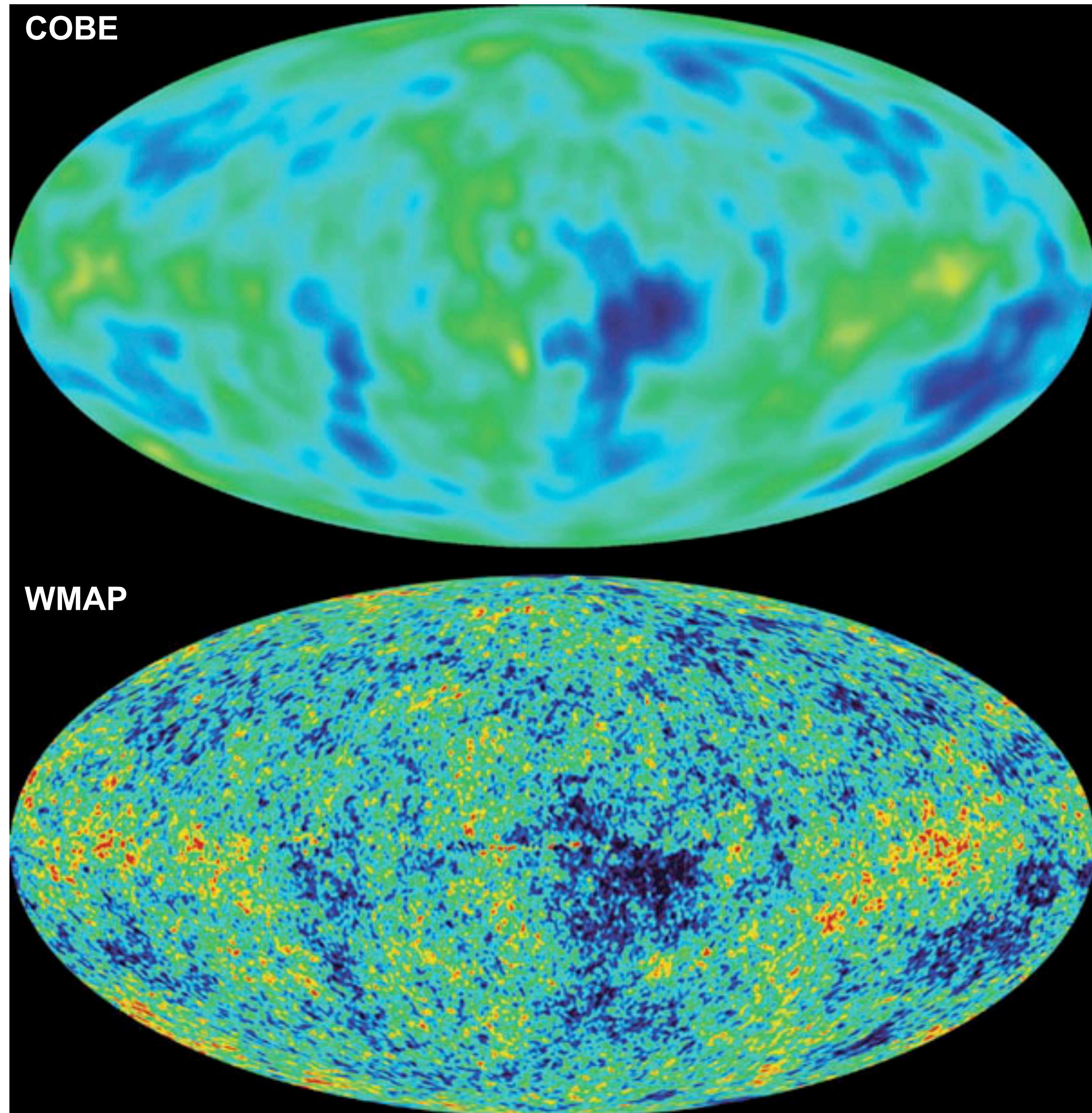
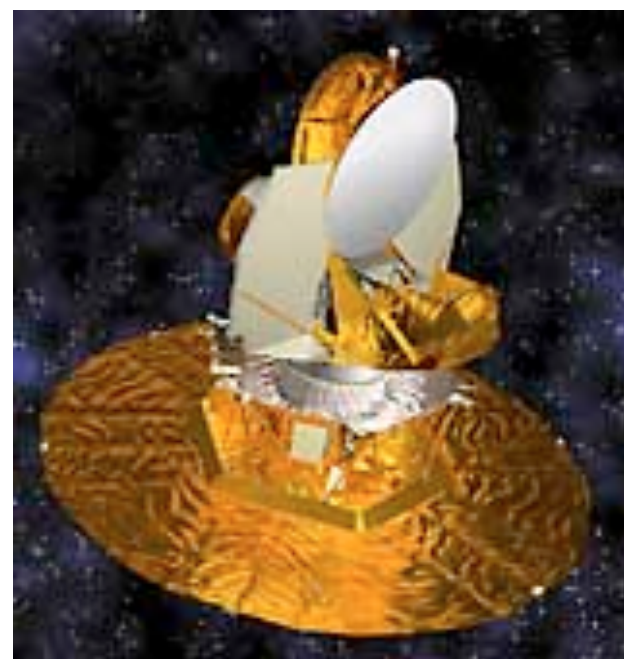


COBE
1989

COBEに比べ、

- 角度分解能で3 5倍
- 感度で1 0倍の改善

WMAP
2001



WMAP サイエンスチーム

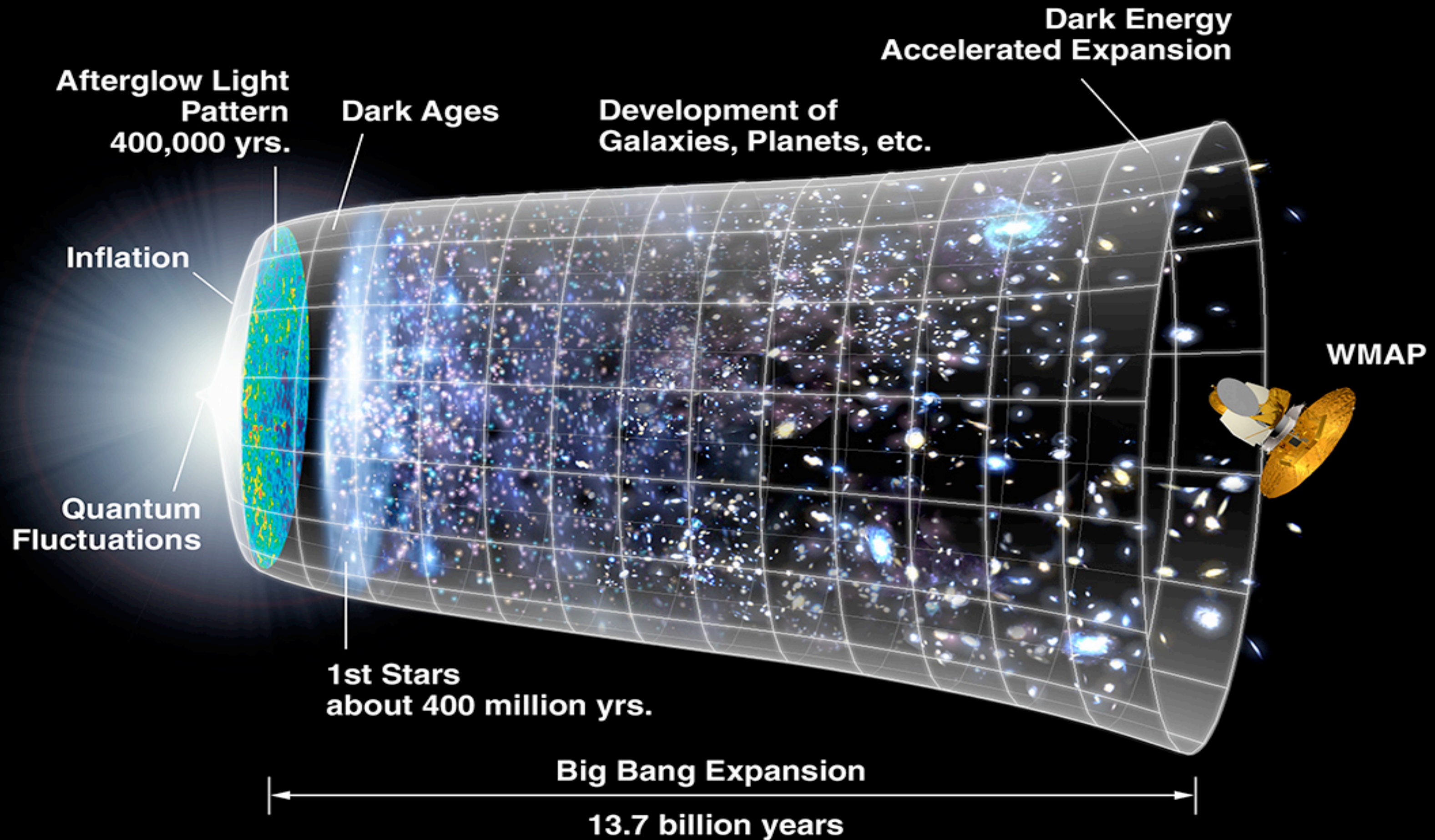


- WMAP: 2001年6月打ち上げ
- 2010年夏まで運用；20人くらいでやっています

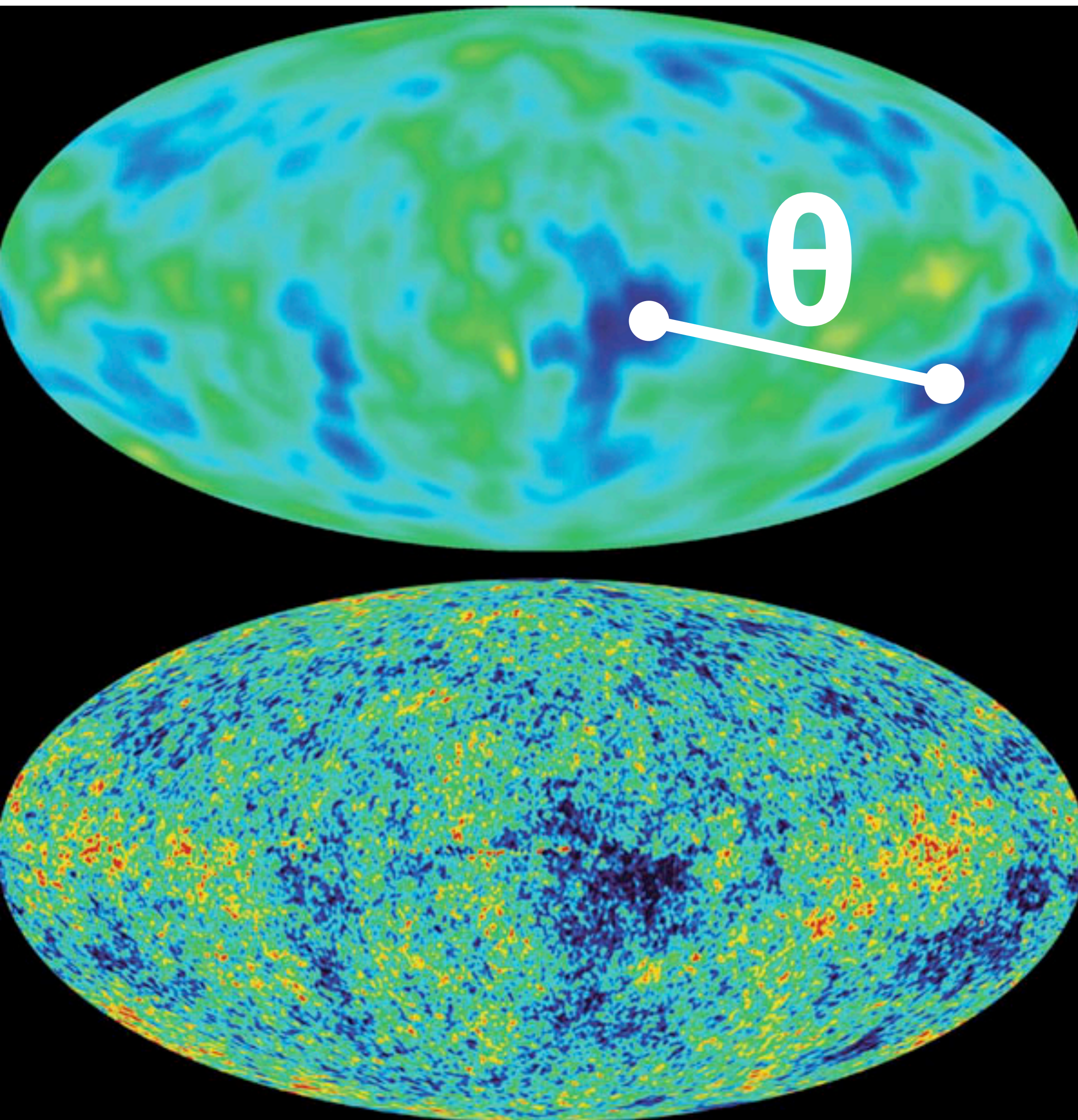
WMAPの成果(代表的なもの)

- 宇宙の年齢を**137億歳**と決定
- 通常物質と暗黒物質の量、暗黒エネルギーの量を決定
 - 通常物質(水素・ヘリウム): **5%**
 - 暗黒物質: **23%**
 - 暗黒エネルギー: **72%**
- ビッグバンの前の宇宙の状態に迫った
 - 「**インフレーション宇宙**」に新しい知見

マイクロ波背景輻射: 光で探る事のできる最遠方の宇宙



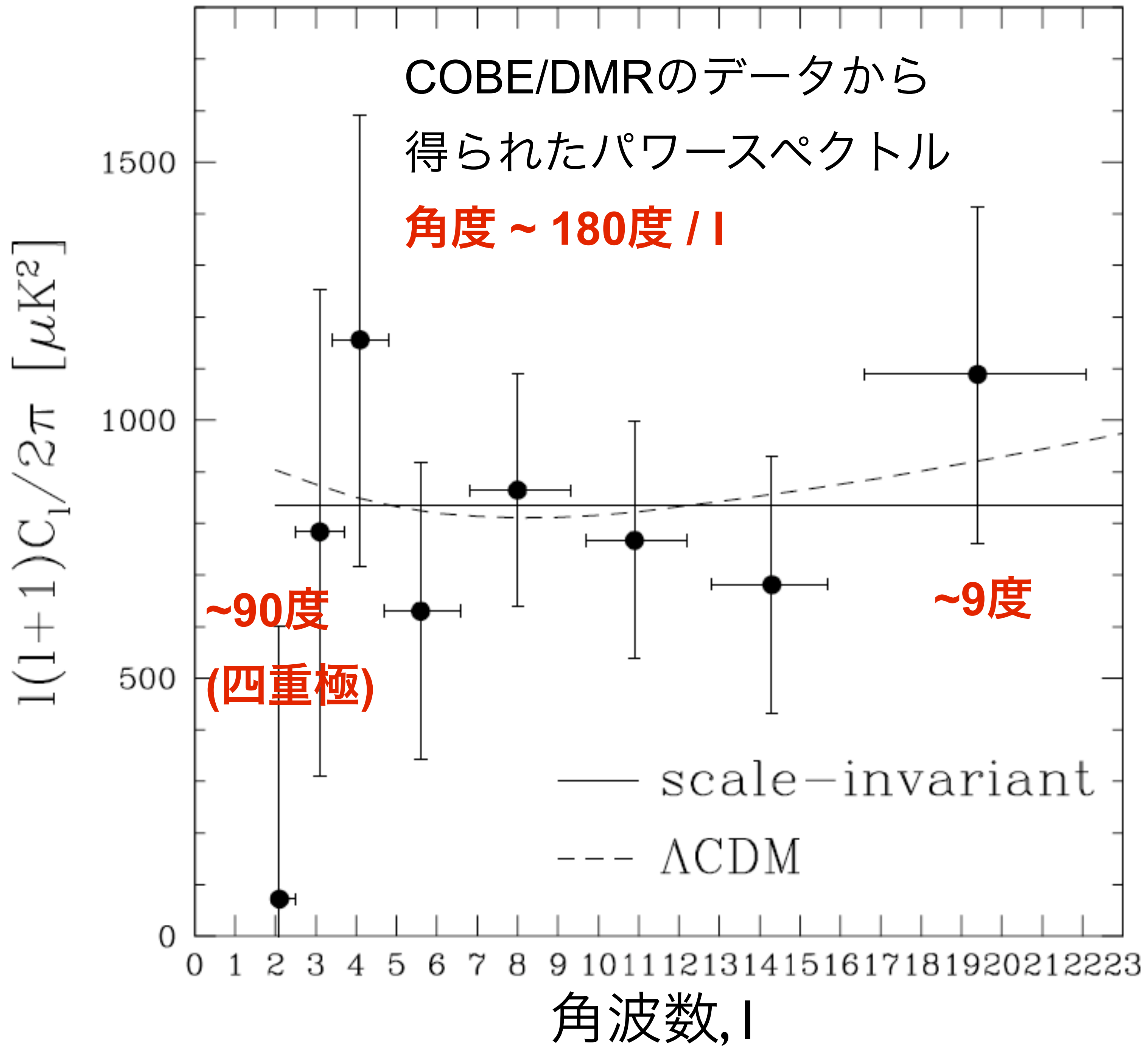
- マイクロ波背景輻射は宇宙が**380,000歳**(温度**3000K**)の時に放たれた。²²
- WMAPにより距離が決定され、宇宙年齢が**137±1億歳**と決定された。



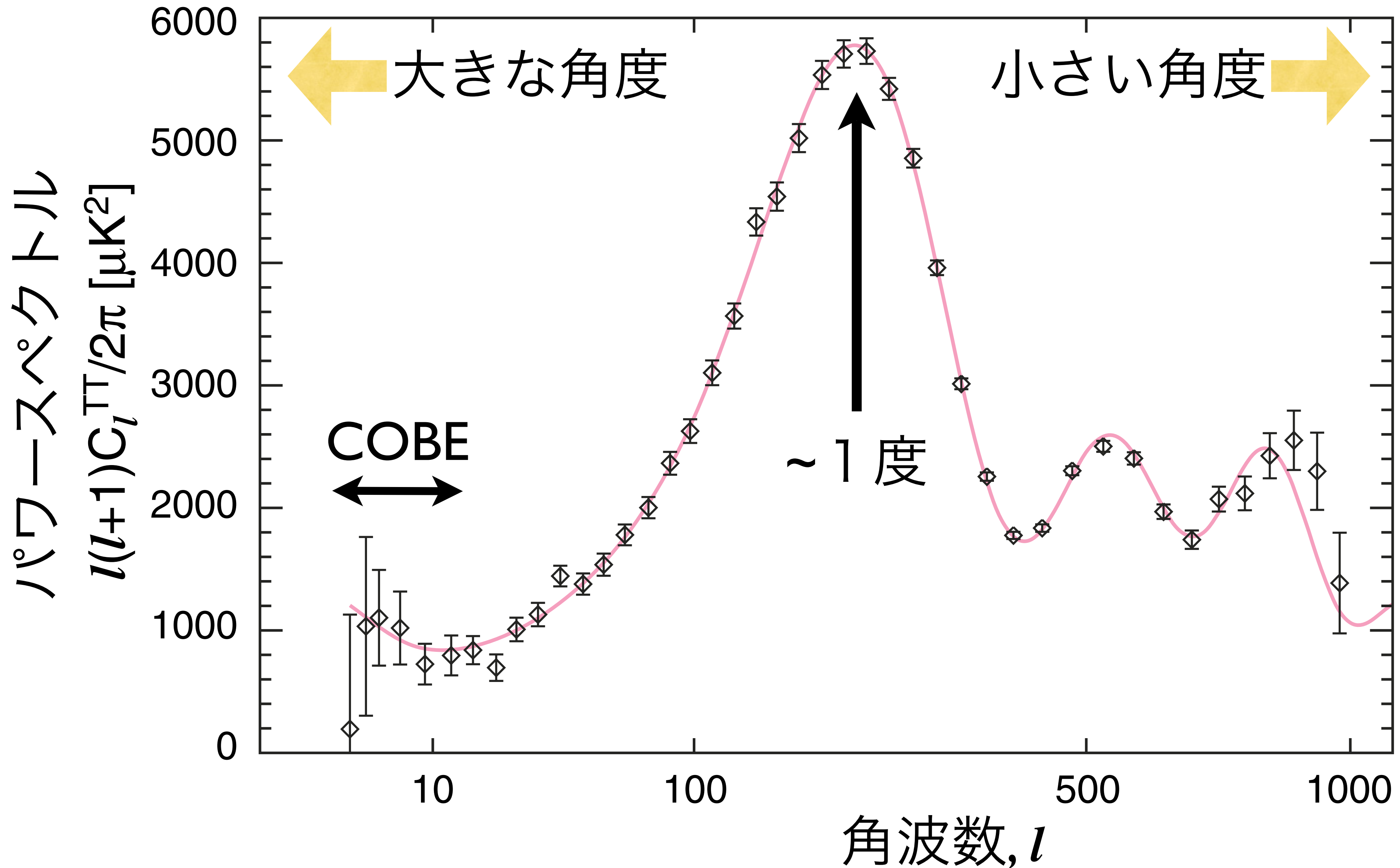
揺らぎの解析：

2点相関関数

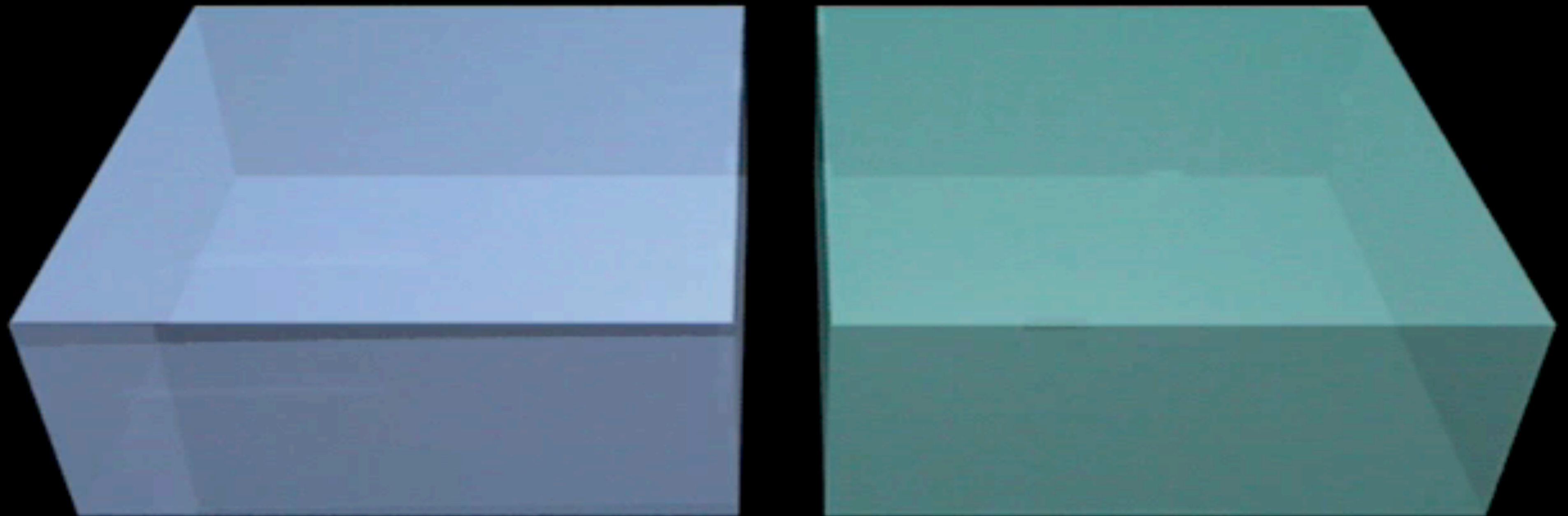
- $C(\theta) = (1/4\pi) \sum (2l+1) C_l P_l(\cos\theta)$
- “パワースペクトル” C_l
– $l \sim 180^\circ / \theta$



WMAPのパワースペクトル



ビッグバン宇宙を伝える音波

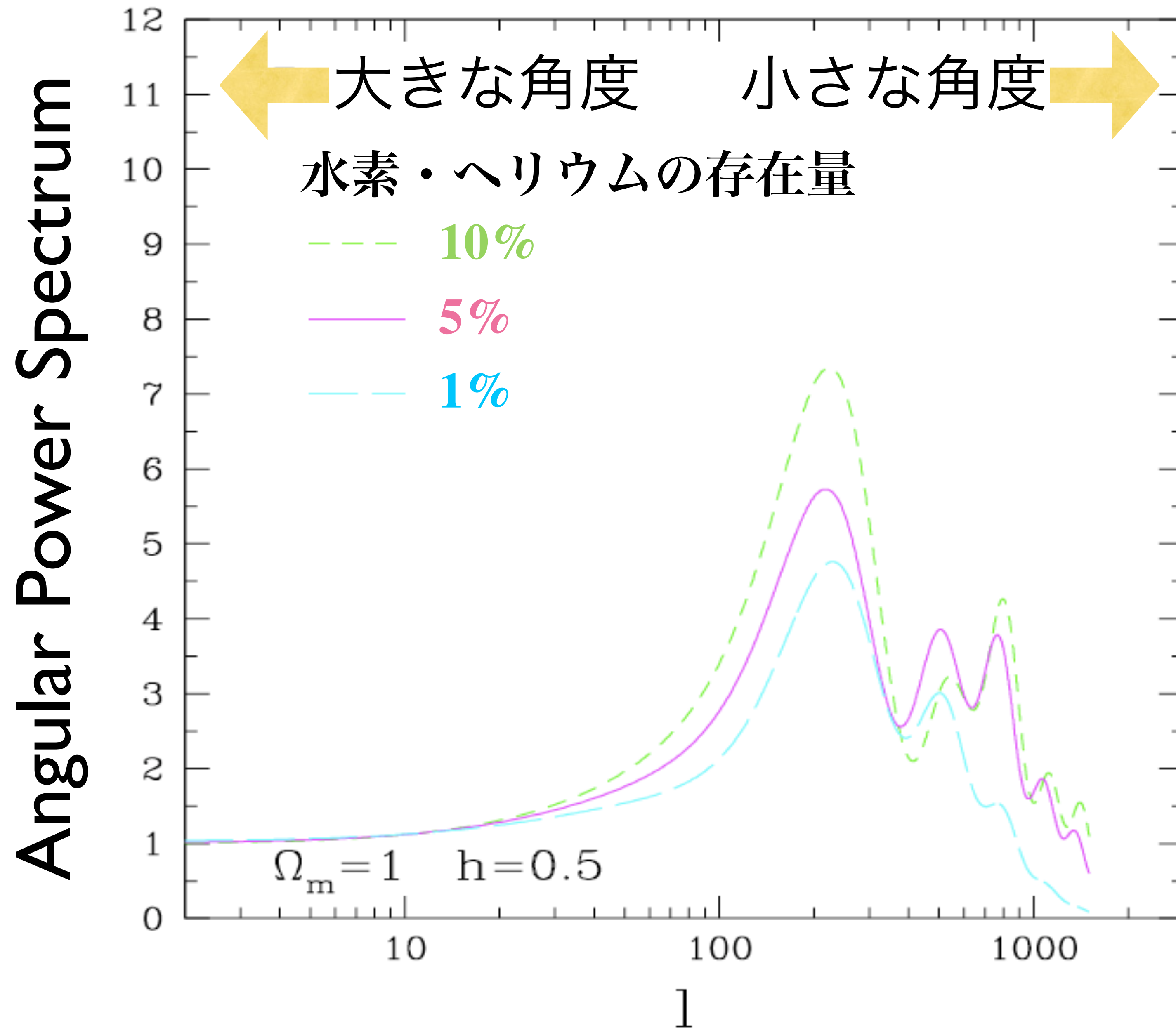


光子-バリオン*流体

$$\text{音速}^2 = \text{光速}^2 / [3(1+R)]; R=3\rho_b/(4\rho_\gamma)$$

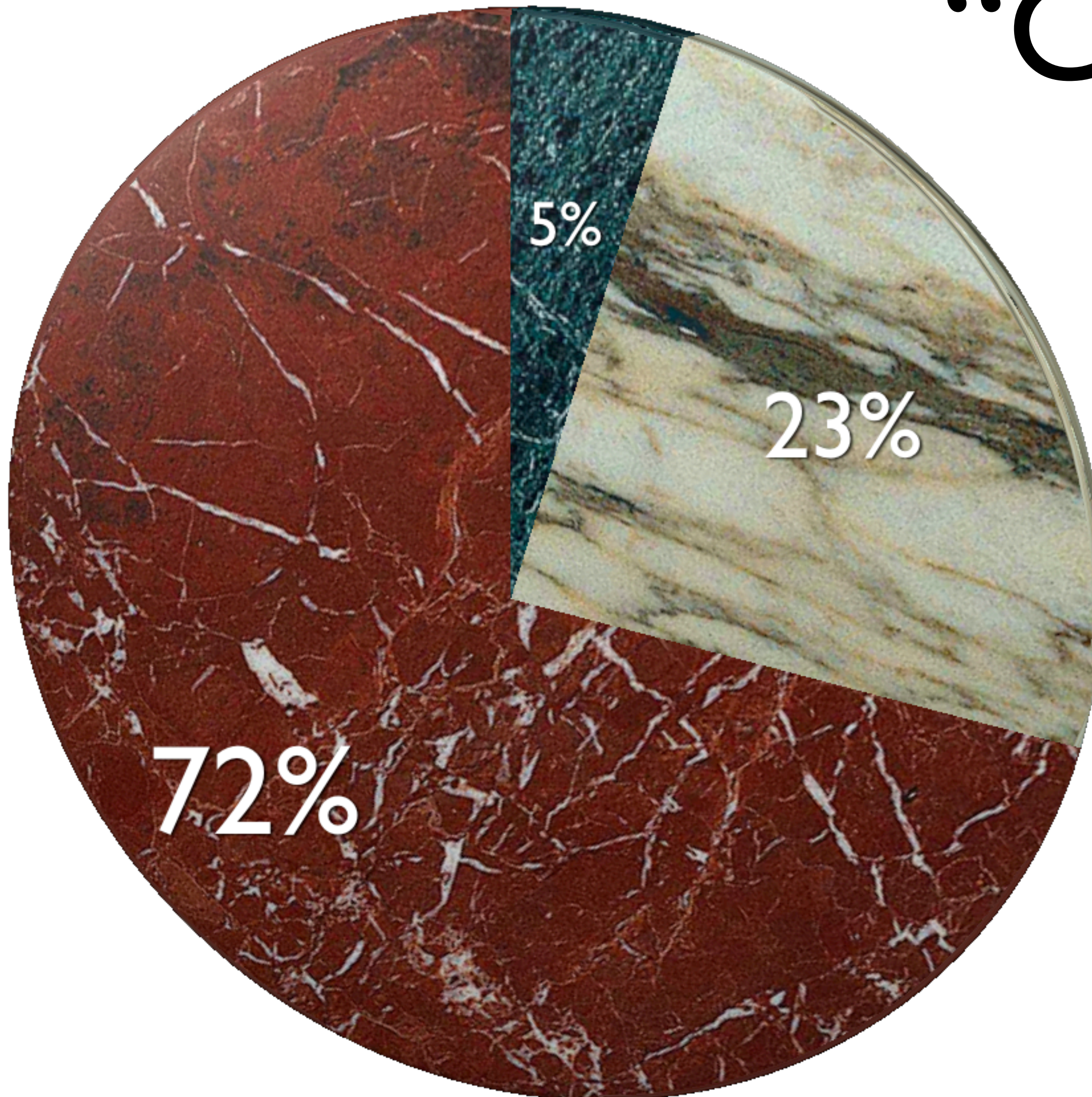
*水素・ヘリウム

波形を用いて水素・ヘリウムを測る



宇宙の組成表

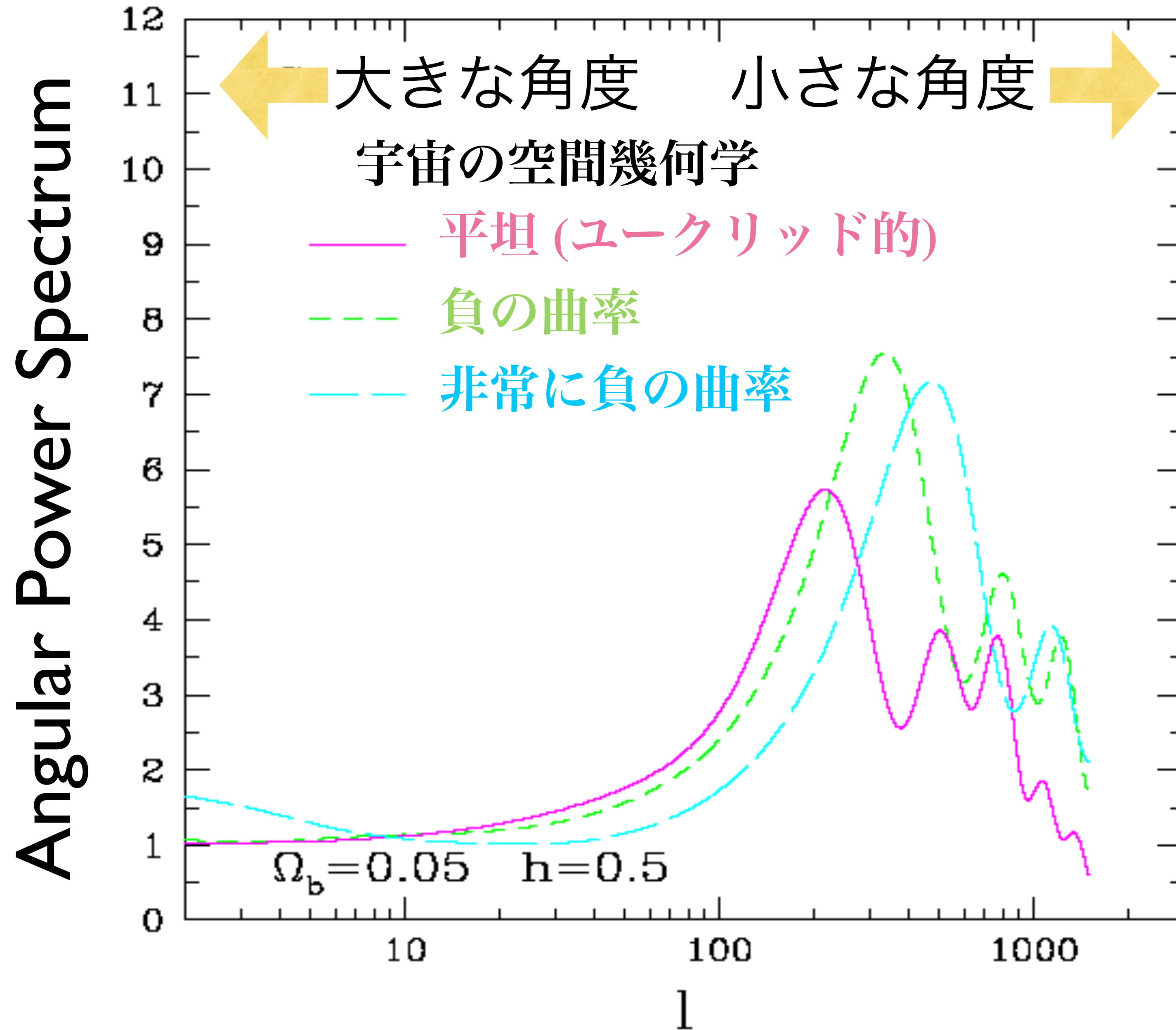
“Cosmic Pie Chart”



- 宇宙論観測により、宇宙の組成が正確に決められた
- その結果、**我々は宇宙の95%を理解できていない事**がわかった！

- 水素とヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

波形を用いて宇宙の幾何学を測る



宇宙の空間幾何学



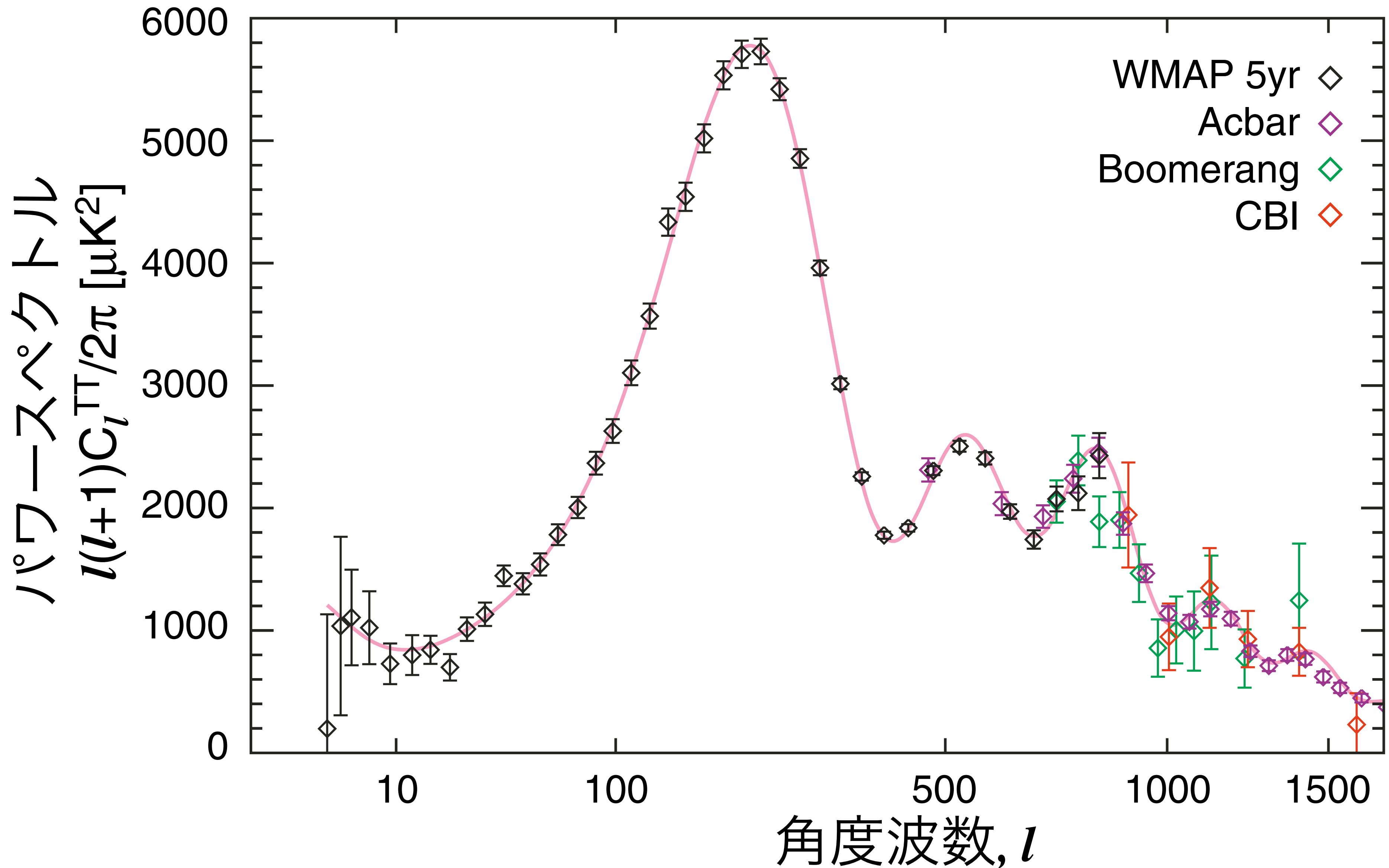
より初期宇宙へ

- マイクロ波背景輻射は宇宙が380,000歳の時の物理状態を正確に保存している。
- それより以前に行けないか？

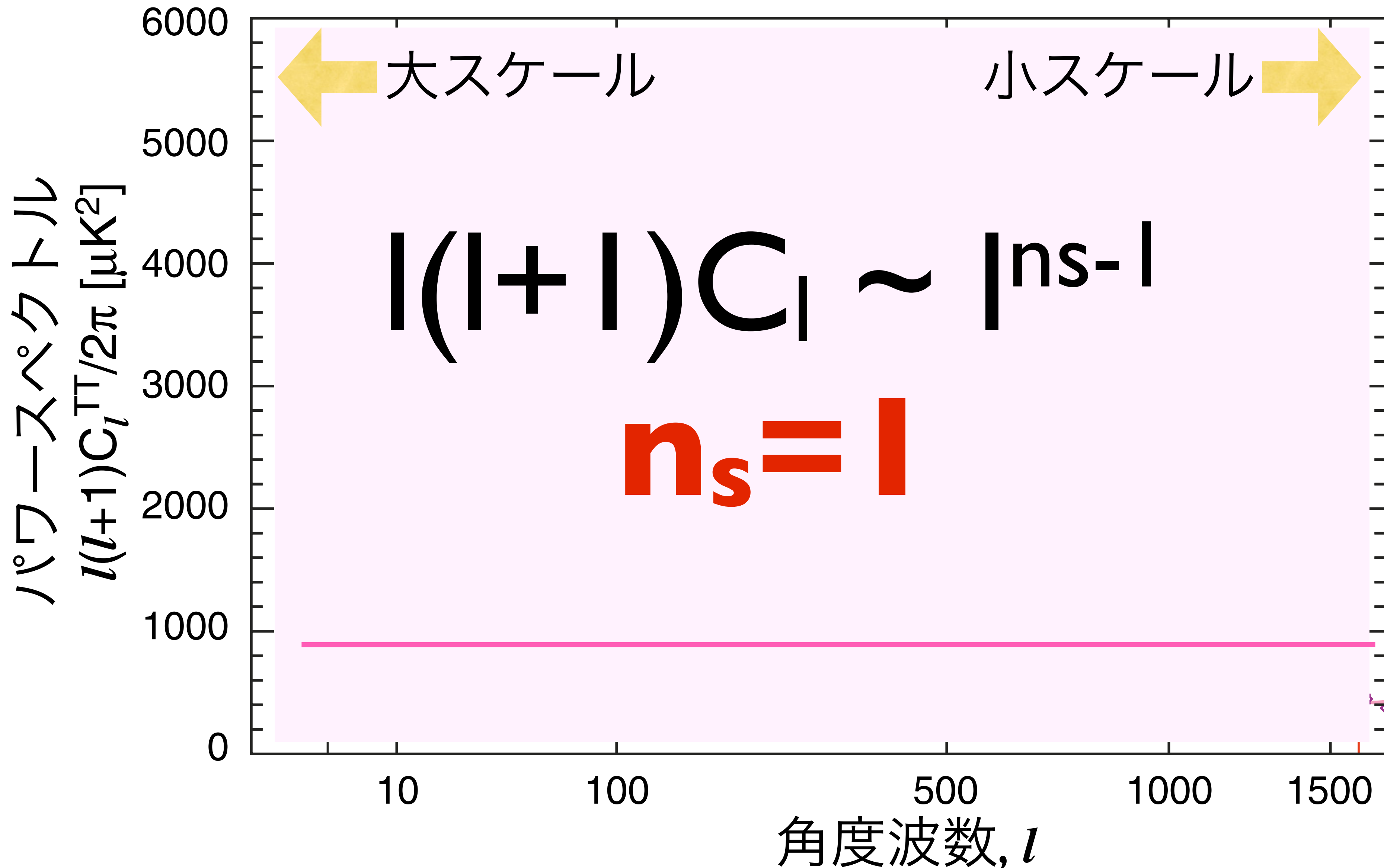
揺らぎの起源

- 音波は、種となる揺らぎがなければ発生しない。
- **何が初期揺らぎを作ったのか？**
- 観測される揺らぎの性質を用いれば、その揺らぎの起源、すなわち原始宇宙の物理の解明へ！

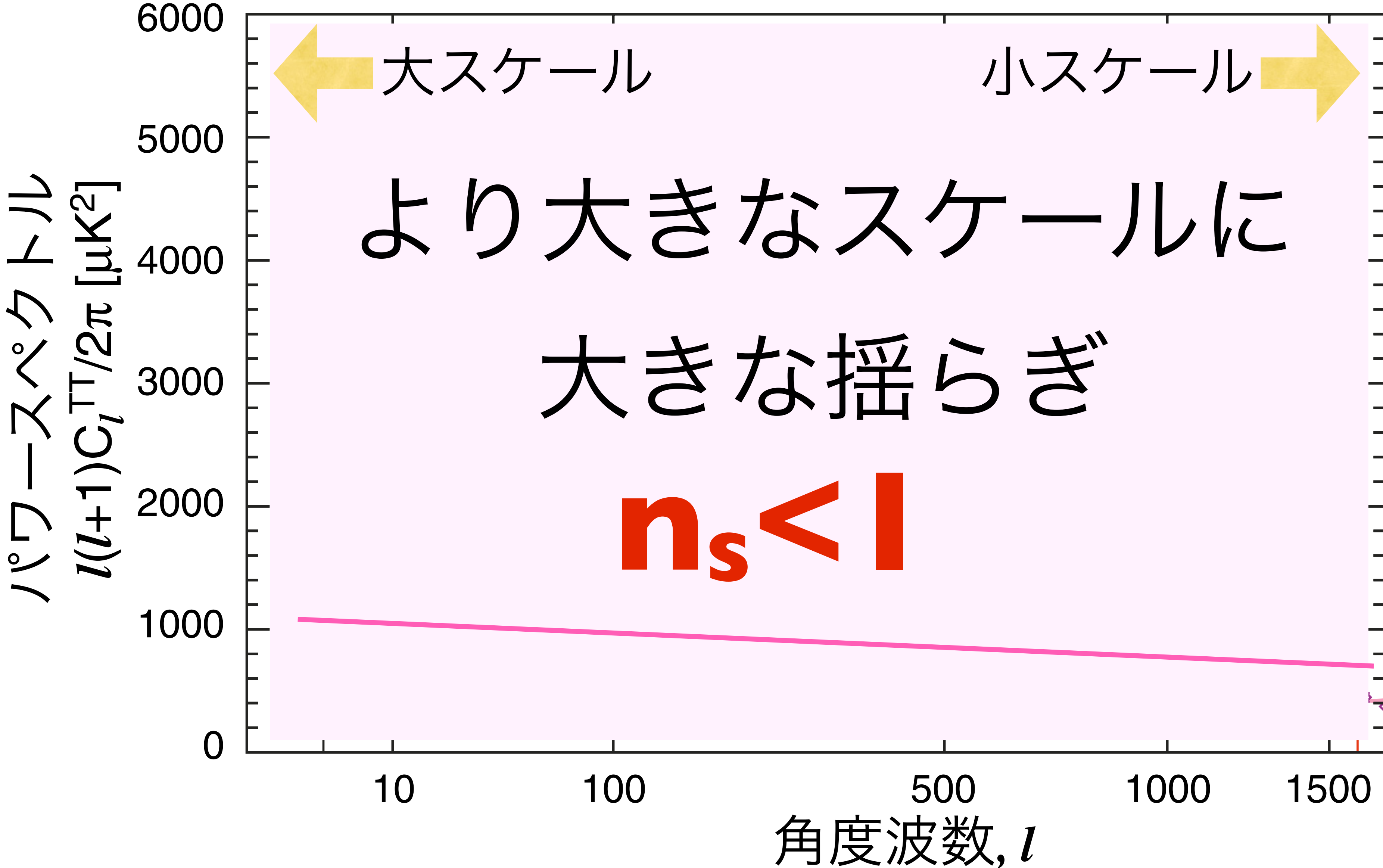
音波を取り除いてみる



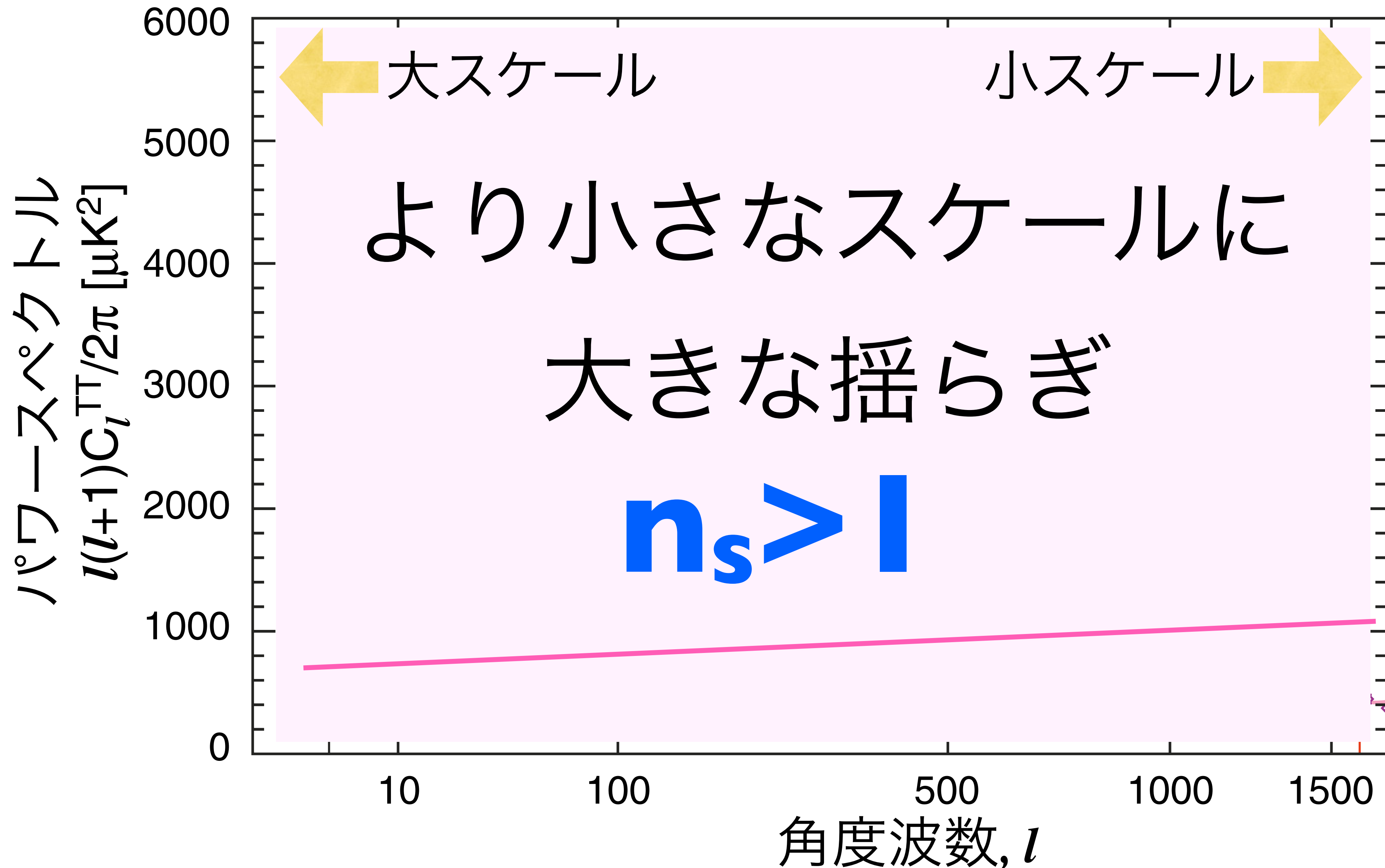
スケール不変な原始揺らぎ



原始宇宙は完全にスケール不変でないかもしれない



あるいは、こんな感じ



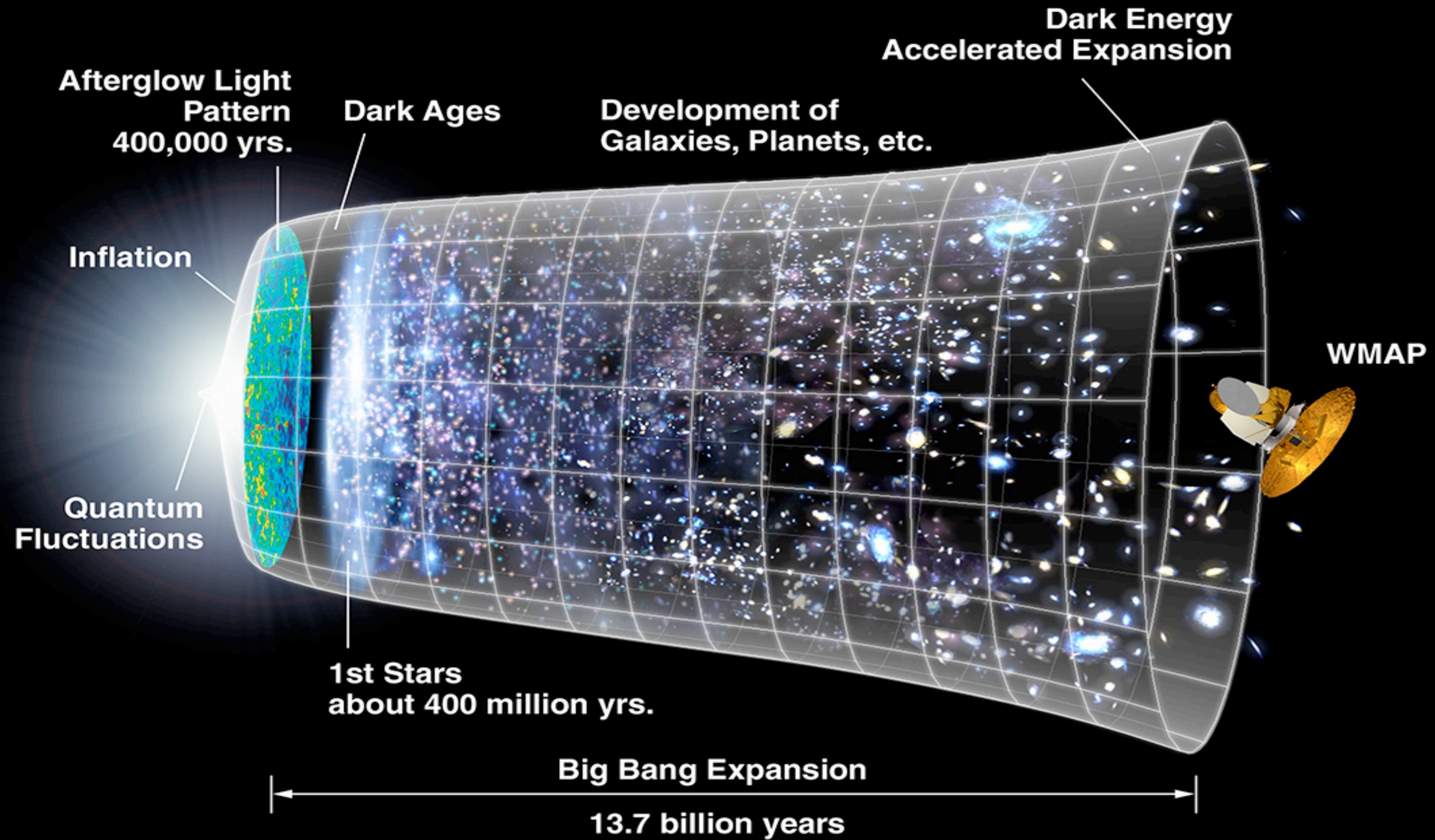
原始宇宙へ

- 現在、原始宇宙を記述する理論として最も有望なのが**インフレーション理論**。この理論によれば：
 - 宇宙膨張は、宇宙誕生まもなく**加速膨張**を始めた。
 - 加速膨張により、空間が急激に伸ばされた。
 - 10^{-36} 秒程度の中に原子核のサイズ($\sim 10^{-15}\text{m}$)が、天文学的なサイズ($1\text{AU}\sim 10^{11}\text{m}$)に伸ばされる！

宇宙創成に迫る

- 現在の考え
 - ビッグバン以前の宇宙は、冷たかった。
- WMAPの結果により、宇宙は誕生まもなく急激な加速膨張（＝インフレーション）を起こした事が、明らかになりつつある。
 - 急激な膨張は、宇宙の急激な冷却を意味する
- インフレーションが終わる頃、膨張のエネルギーが解放され、宇宙は火の玉状態（＝ビッグバン）となった。
- ビッグバンは宇宙の始まりではない。
- しかし、観測的にどう証明すれば良いのか？

インフレーション = 原始暗黒エネルギー



原始宇宙へ

- 現在、原始宇宙を記述する理論として最も有望なのが **インフレーション理論**。この理論によれば：
 - 極微の世界の物理が、天文学的なスケールに現れる
 - 極微の世界の物理 = 量子場の物理
 - **揺らぎの起源は、量子場の揺らぎである**
- どのスケールにどの程度の揺らぎがあるかは、インフレーション中の膨張速度と量子場の運動で決定される

量子場の揺らぎ

(量子場の揺らぎ, $\delta\varphi$ [エネルギー])

= $h \times$ (宇宙の膨張率, H [1/時間])
プランク定数

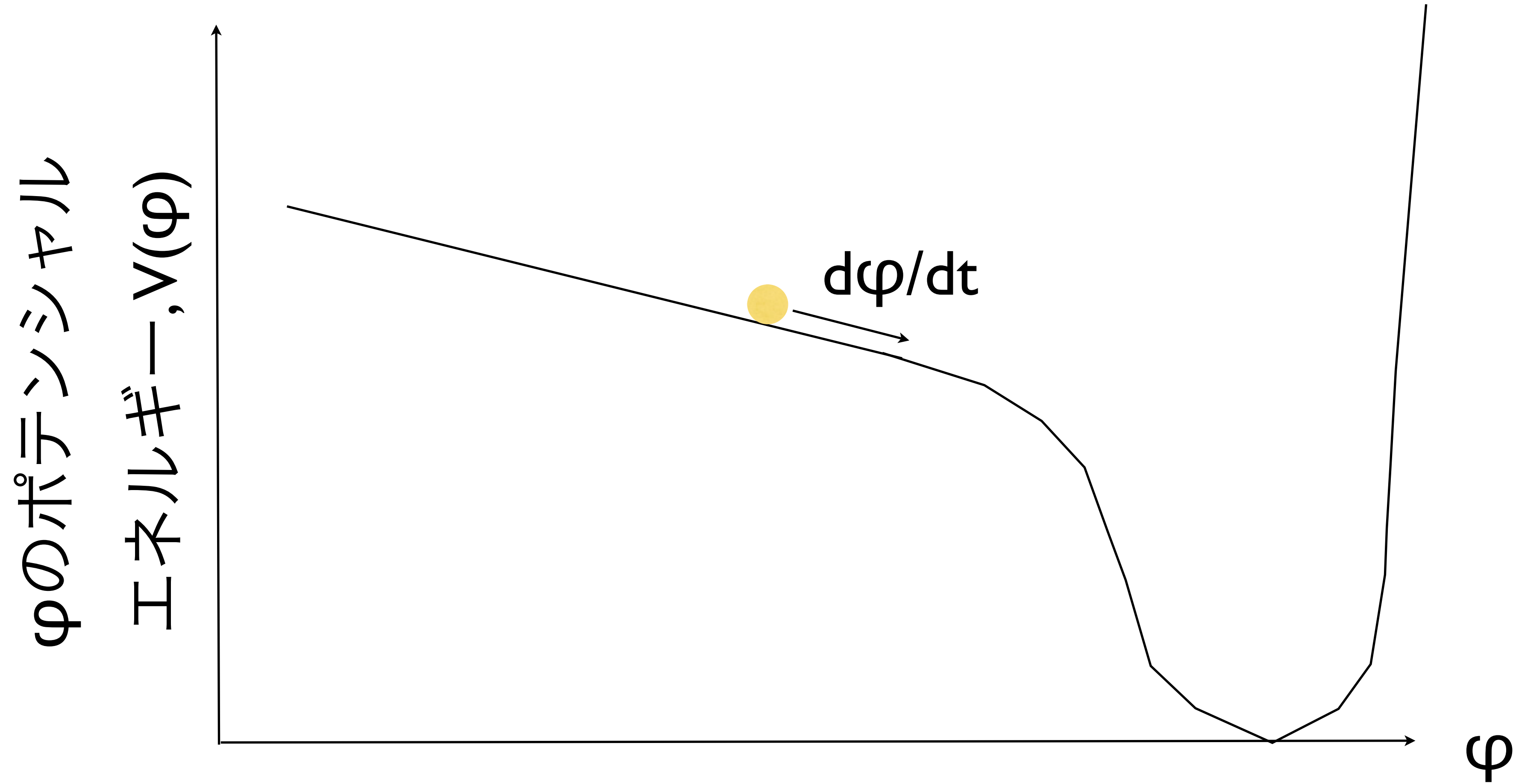
- 温度揺らぎは

(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

= $(1/5) \times H\delta\varphi / (d\varphi/dt)$

= $(h/5) \times H^2 / (d\varphi/dt)$

量子場の運動



- アインシュタイン方程式より、 $H^2 \sim V/(3M_{\text{planck}}^2)$

量子場の揺らぎ

(量子場の揺らぎ, $\delta\varphi$)

= $h \times$ (宇宙の膨張率, H)

- 温度揺らぎは

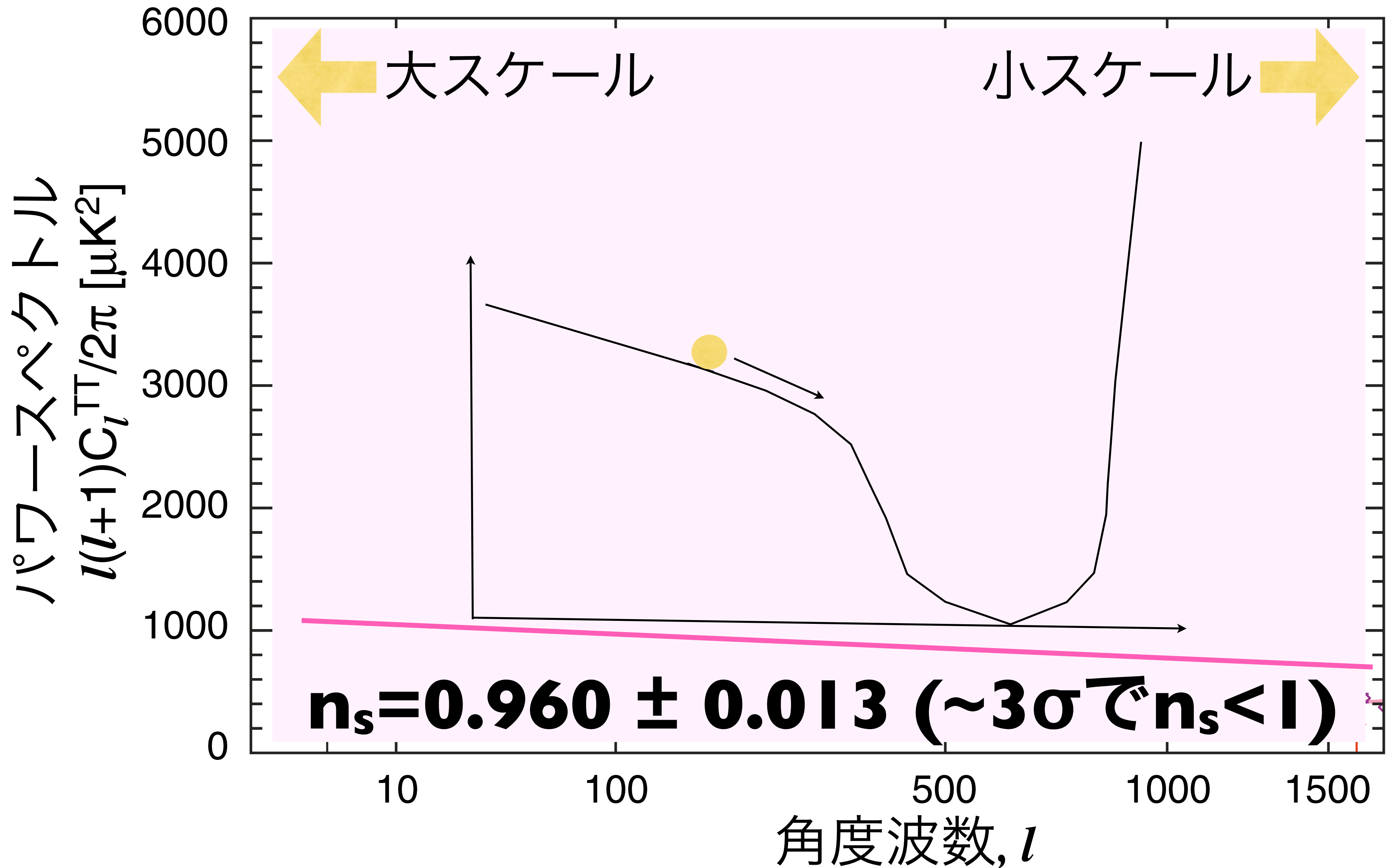
(温度揺らぎ, $\delta T/T$)

= $(1/5) \times H\delta\varphi / (d\varphi/dt)$

= $(h/5) \times H^2 / (d\varphi/dt)$

$\sim (h/15M_{\text{planck}}^2) \times V / (d\varphi/dt)$

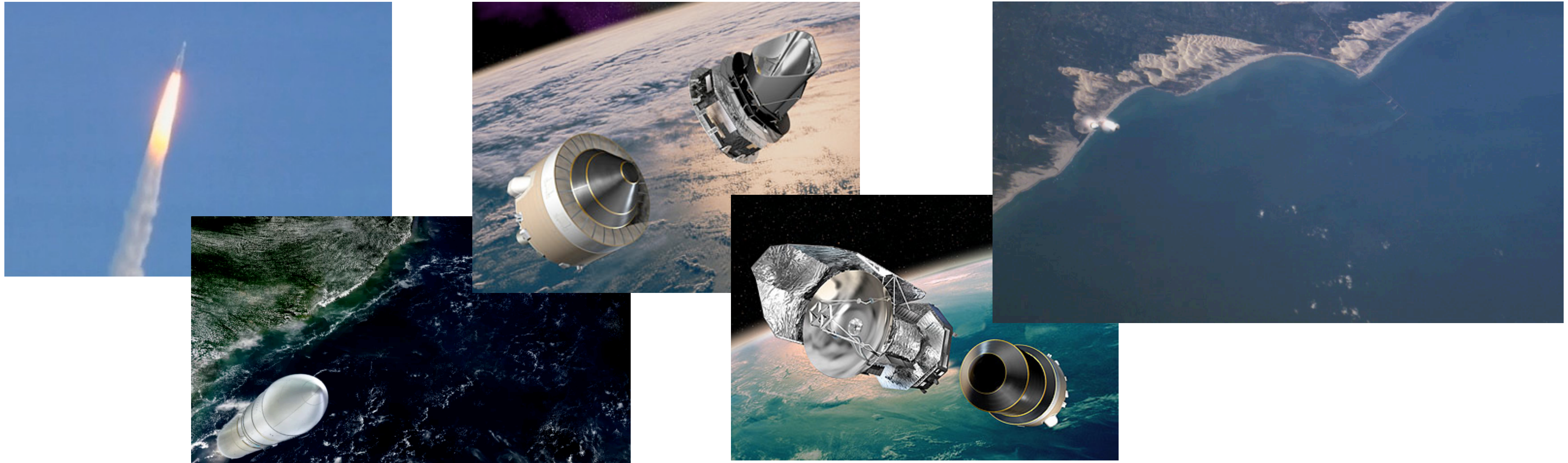
温度揺らぎから原始揺らぎへ



マイクロ波背景輻射のフロンティア

- 原始重力波
- 非ガウス性

プランク衛星打ち上げ成功！



- 5月14日，仏領ギアナの宇宙センターから無事打ち上げ
- ハーシェル望遠鏡との切り離しも無事完了
- プランクはWMAPよりもさらに感度が良い

原始重力波

(重力波の振幅, $h_{(+,x)}$)

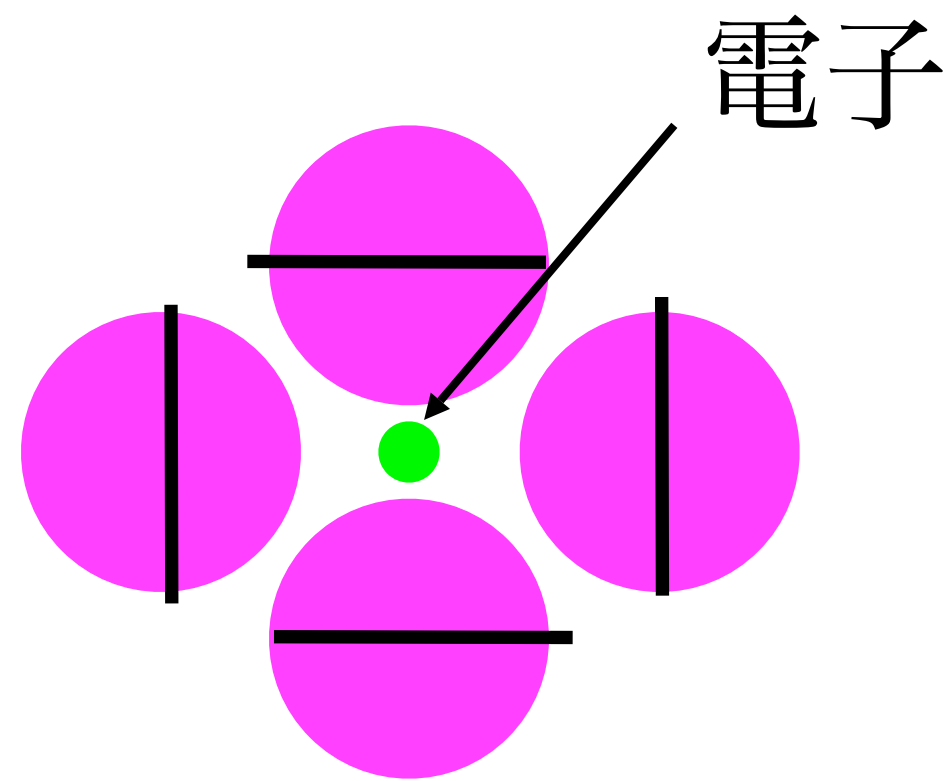
$$= h \times (\text{宇宙の膨張率, } H) / M_{\text{planck}}$$

- 量子揺らぎによって、重力波が生成される
- 重力波は相互作用が極めて弱く、宇宙は重力波に対して極めて透明。
- **インフレーションの時期を直接観測できる可能性**

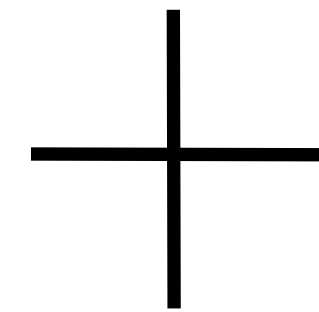
宇宙マイクロ波背景輻射の偏光

- $z \sim 1100$ で四重極の温度揺らぎがあれば偏光が生ずる。

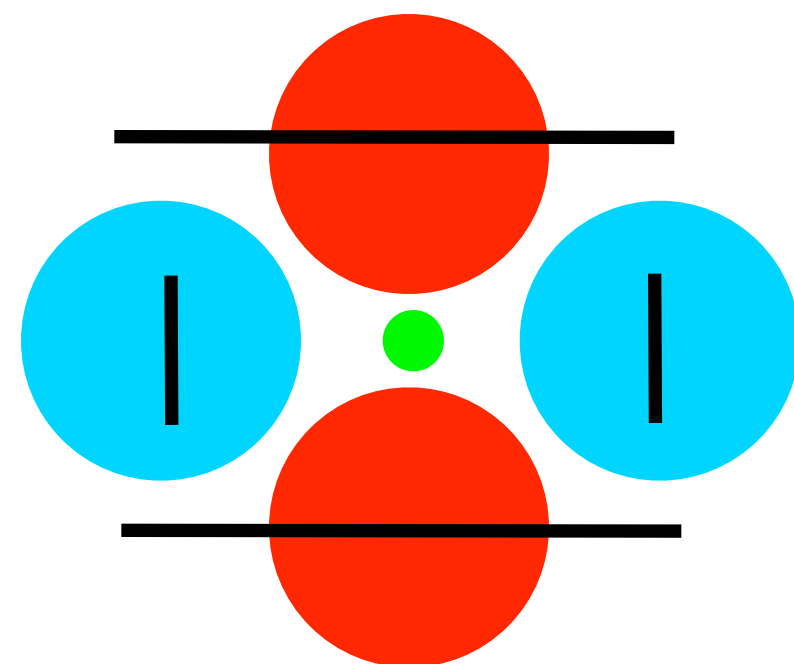
四重極温度
揺らぎなし



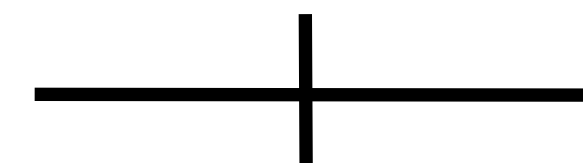
偏光は生じない



四重極温度
揺らぎあり

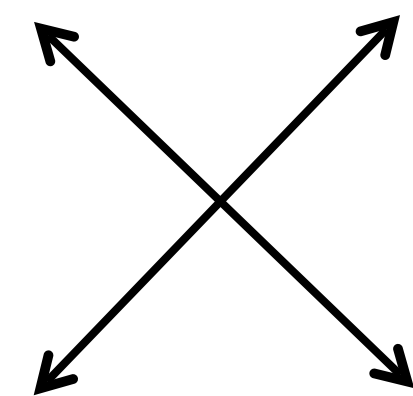
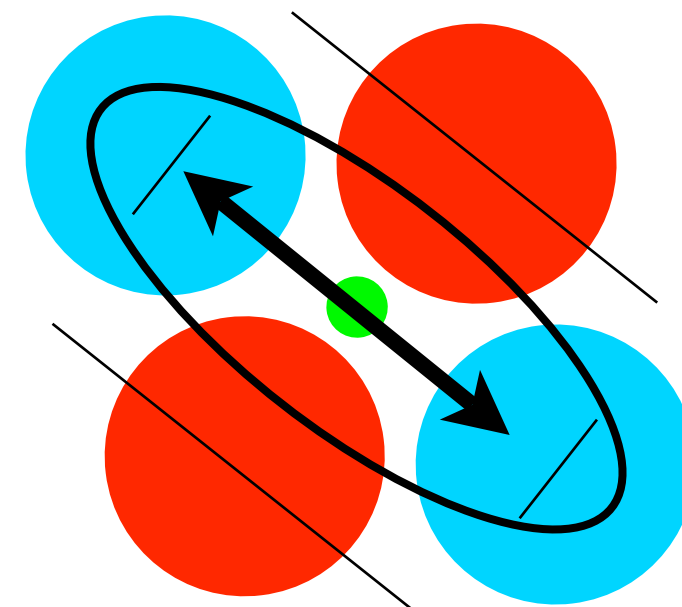
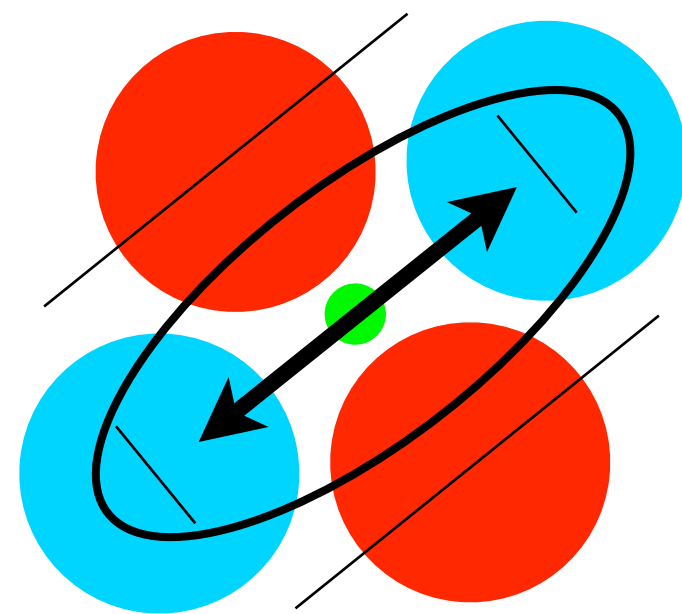
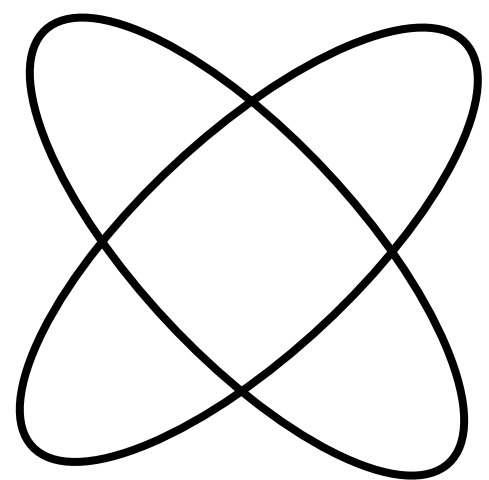
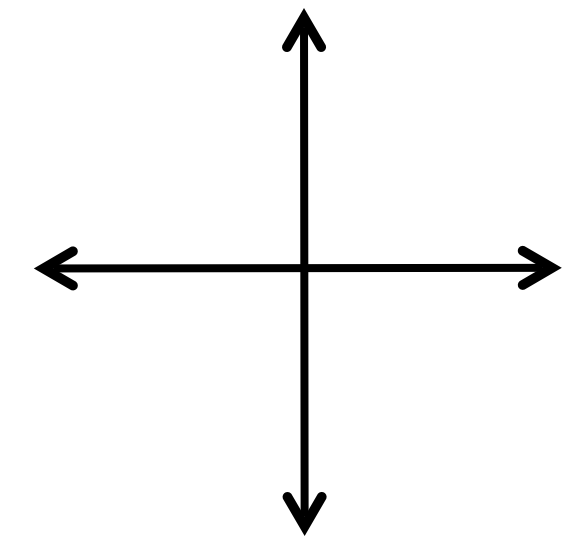
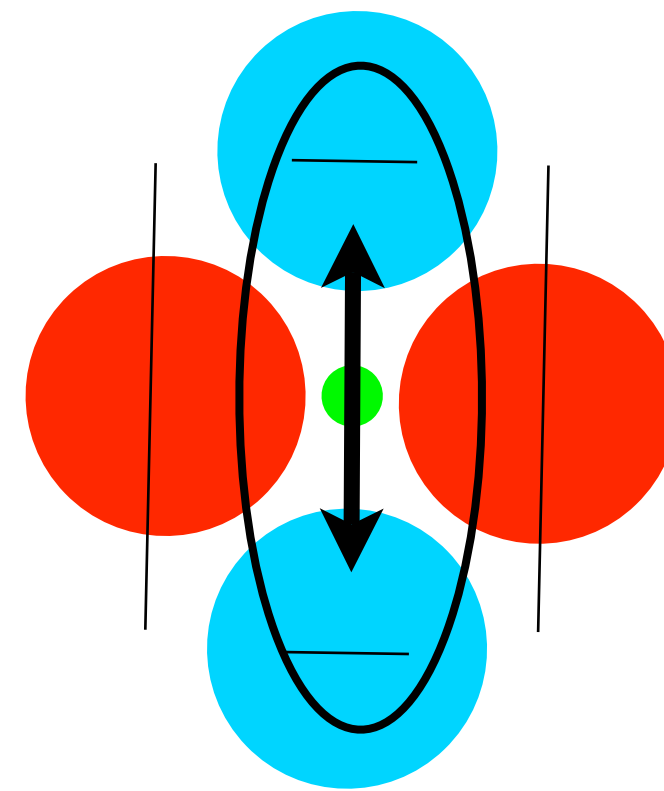
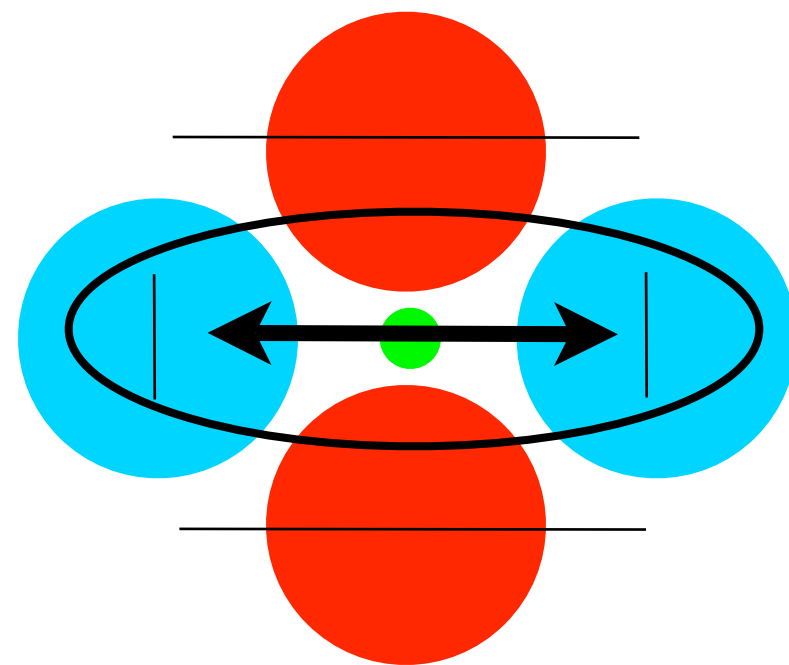
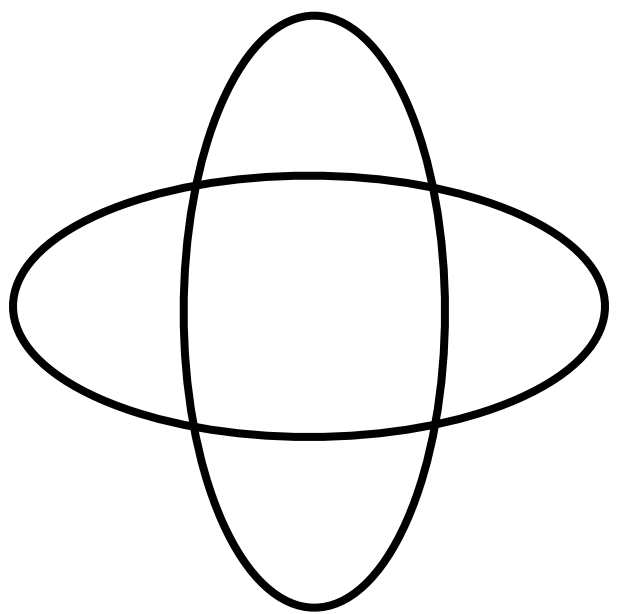


偏光が生じる



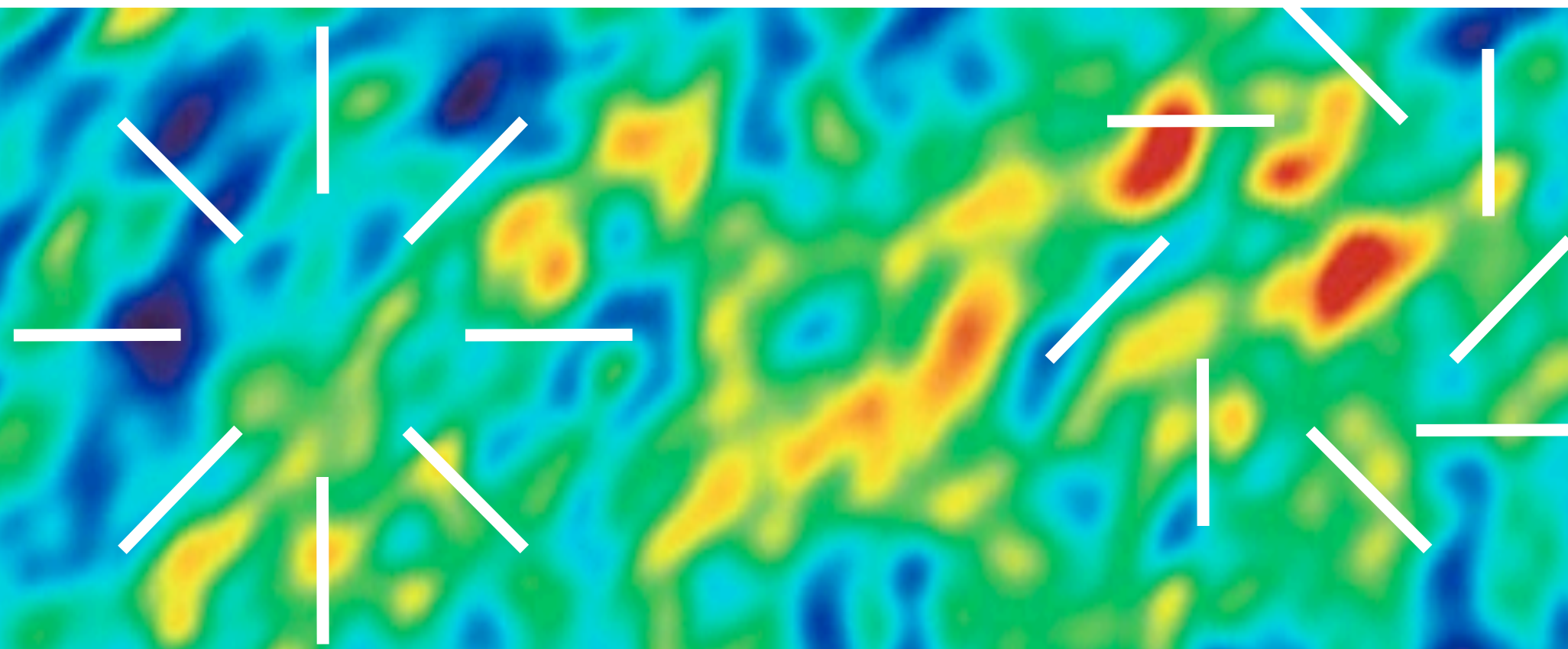
原始重力波による四重極の生成

- 重力波が伝播すると、空間に四重極の歪みが生じる
 - 空間が伸びる -> 赤方偏移 -> 温度が下がる
 - 空間が縮まる -> 青方偏移 -> 温度が上がる



EモードとBモード偏光

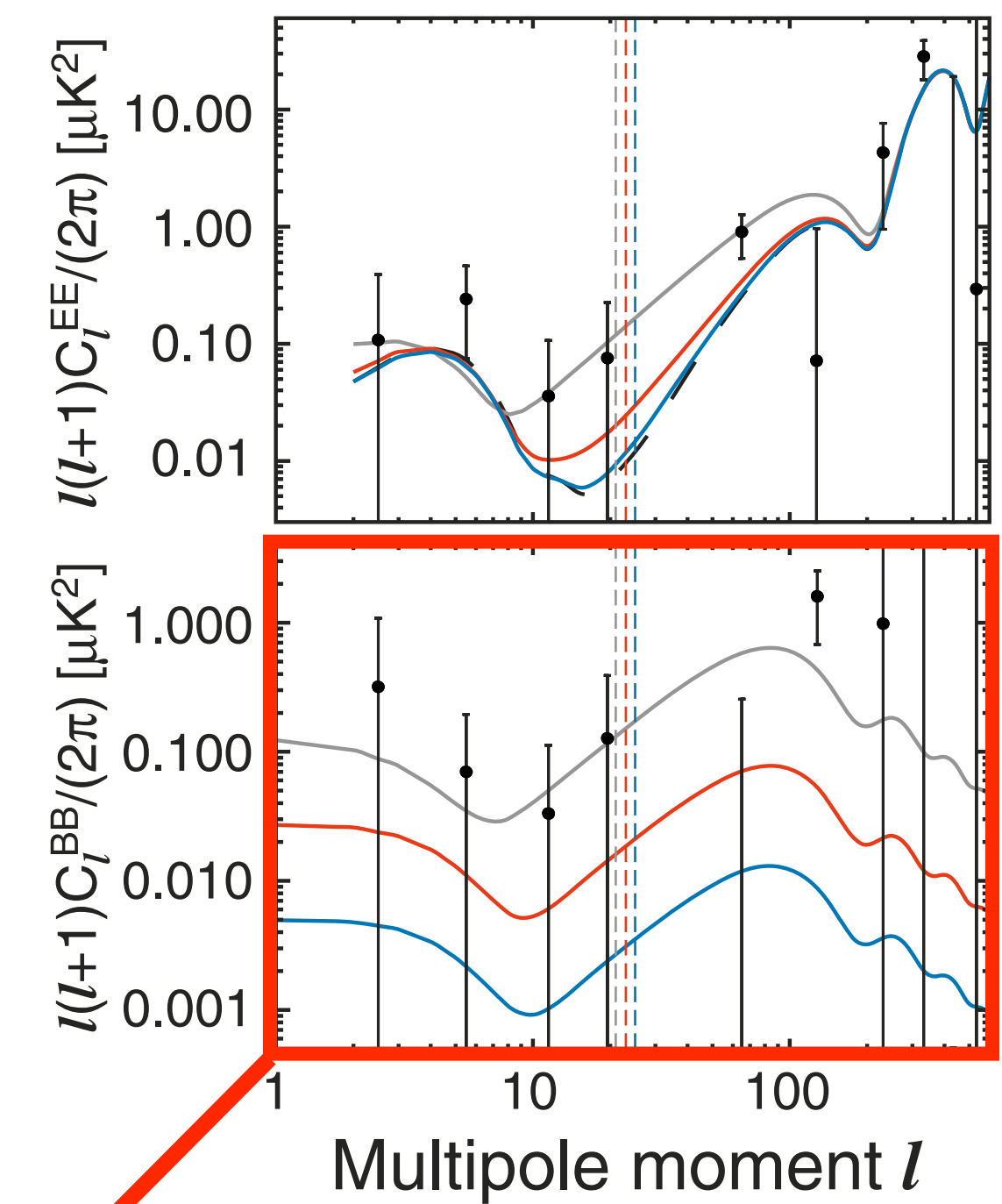
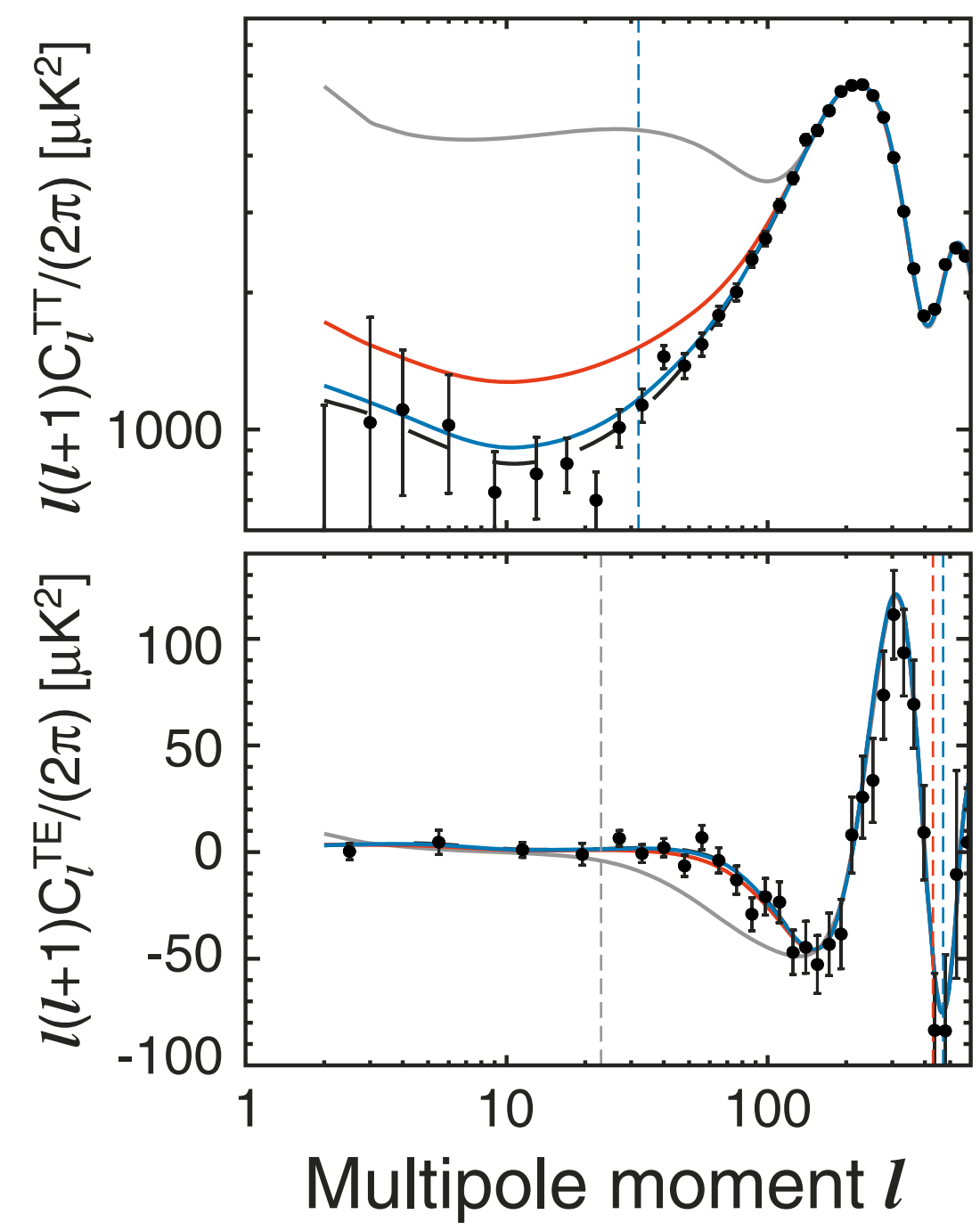
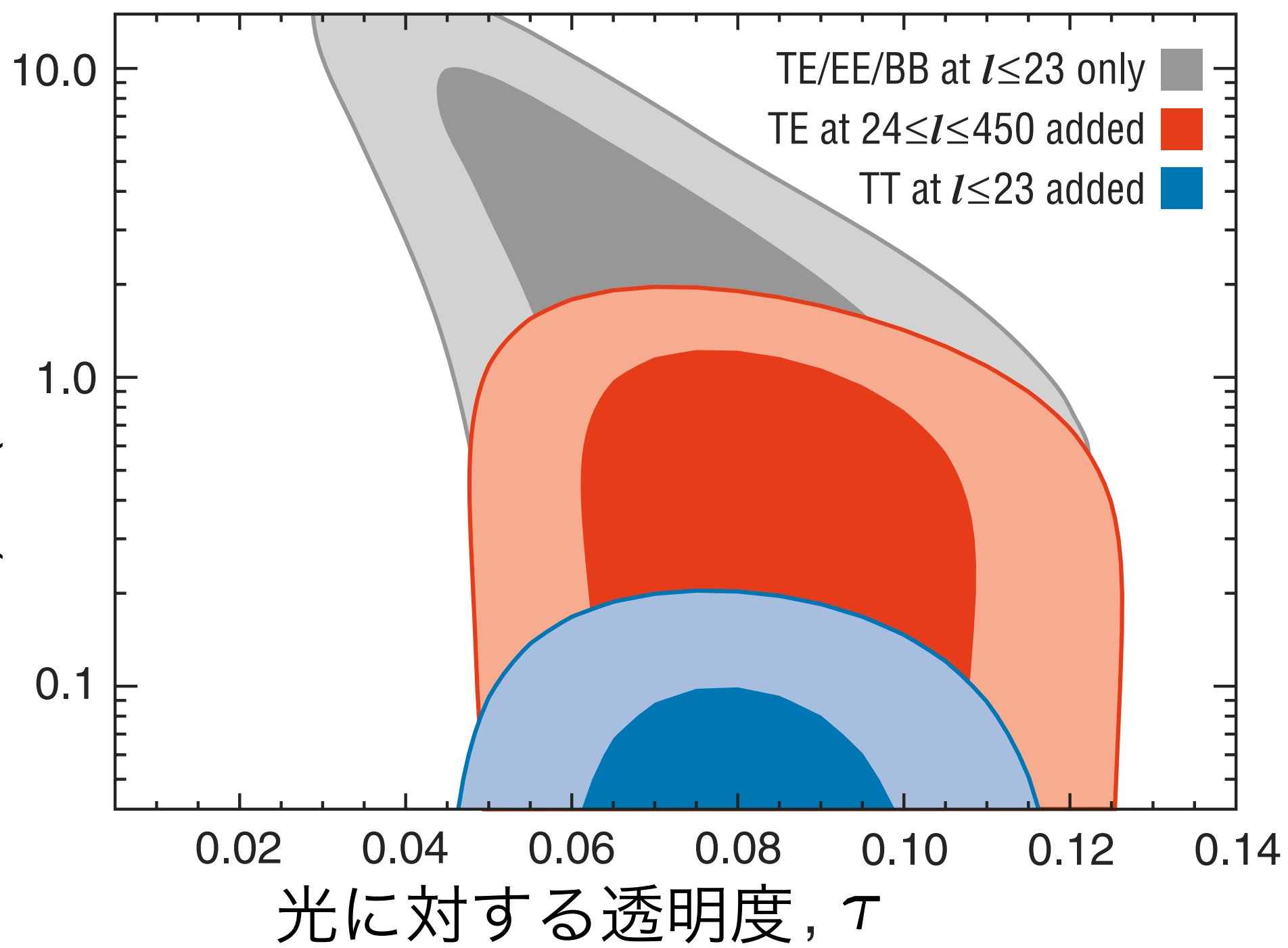
- 偏光は方向を持つので、あるパターンを作る
 - 発散タイプのパターン: Eモード
 - 渦タイプのパターン: Bモード



E-モード

B-モード

(重力波の振幅)² / (密度揺らぎの振幅)²



● **Bモード偏光はまだ検出されていない**

● 原始重力波の大きさへ上限：

● (重力波の振幅)² / (密度揺らぎの振幅)² < 0.22

まとめ

- 宇宙マイクロ波背景輻射がこれまでなしえた事
- ビッグバン理論の証明 (Penzias&Wilson; 1965年)
- 揺らぎの発見 (COBE; 1992年)
- 宇宙の組成の確定 (WMAP; 2003年)
- スケール不変性からのずれ (WMAP, 3σ ; 2008年)
- これからなすべき事
 - より初期宇宙へ：**原始重力波、非ガウス性**

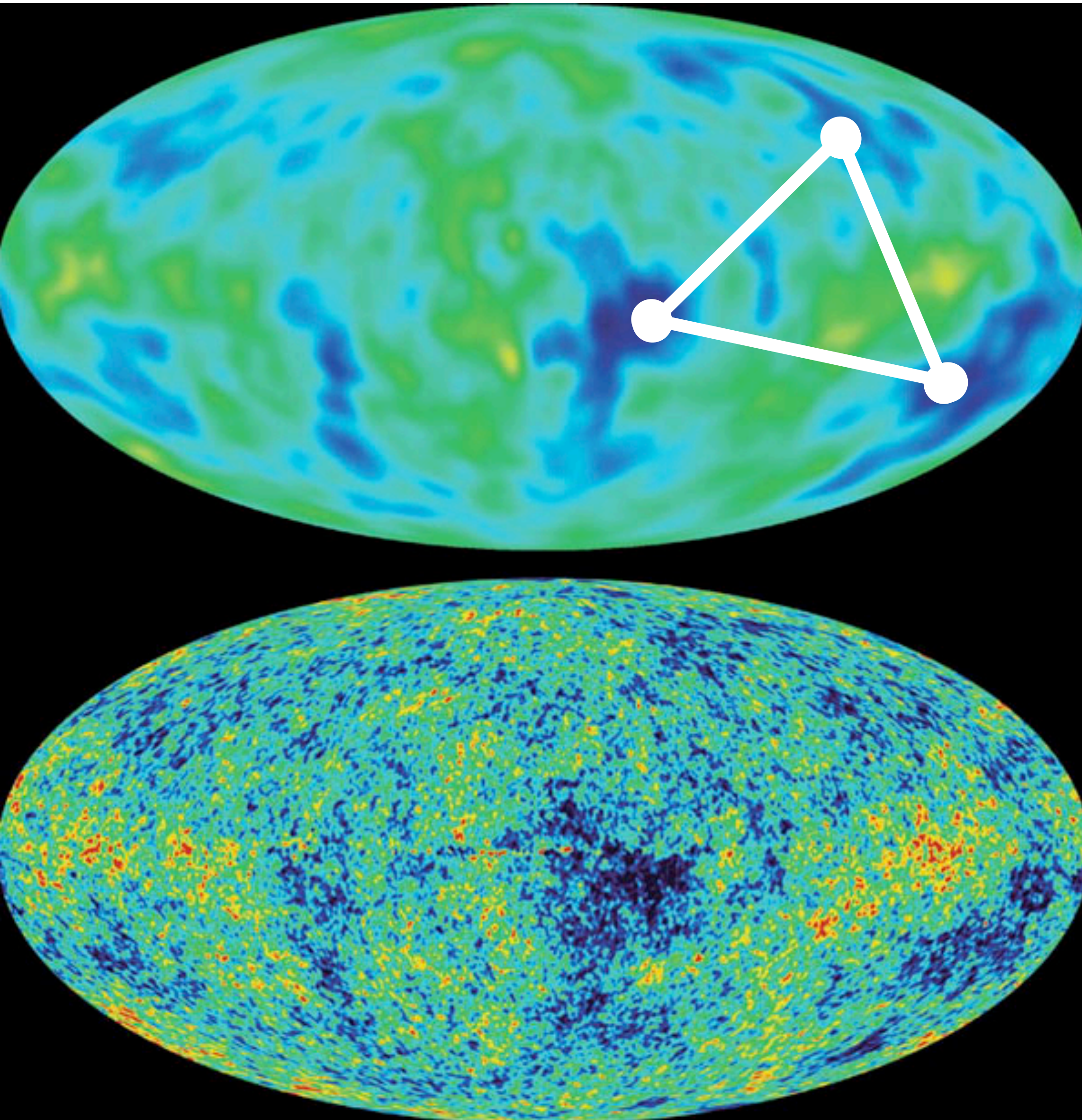
揺らぎのガウス性

- インフレーション理論は、原始揺らぎがガウス統計に従う事を予言する。
 - スカラー場の相互作用は弱い
 - 観測される揺らぎは真空の量子揺らぎとして生成される
- **真空の揺らぎ + 相互作用なし = ガウス統計**

揺らぎの非ガウス性

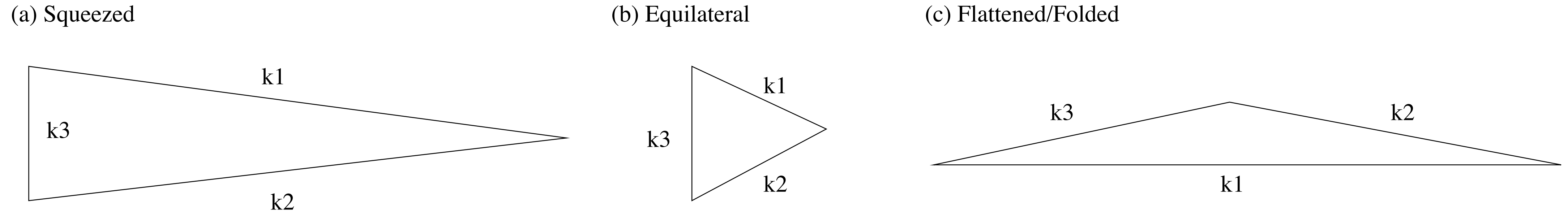
- しかし、実際には相互作用は存在し、真空でもなかったかもしれない？
- ガウス統計に従う揺らぎを導くには、4つの条件を同時に満たす必要がある：
 - 単一のスカラー場から揺らぎが生成された
 - 量子揺らぎの分散関係が $\omega^2 = c_s^2 k^2$ (音速 $c_s =$ 光速 c)
 - スカラー場がゆっくりポテンシャルを転がる
 - 揺らぎが真空から生成

3点相関関数



- 3点相関関数をフーリエ変換したものは“バイスペクトル”と呼ばれる。
- バイスペクトル = $B(k_1, k_2, k_3)$

3 角形の形とインフレーションの物理



- (a) 複数のスカラー場による揺らぎの生成
- (b) 揺らぎの音速が光速より遅い $c_s < c$
- (c) 揺らぎが励起状態において生成された
- 現在、(a)と(b)が観測で制限されているが、まだ有意なシグナルは見つかっていない。

これからの宇宙論

- 我々にたちはだかる、4つの謎：
 - 暗黒エネルギーとは何か
 - 暗黒物質とは何か
 - ビッグバンの起源（=インフレーションの物理）
 - 宇宙の構造はどのように現れ、発展したのか

すみれと暗黒エネルギー



VS



「すみれ」プロジェクト

- すばる望遠鏡を用いた一大プロジェクト
 - 暗黒エネルギーを調べるには、宇宙の膨張速度を徹底的に測る必要がある
 - すばる望遠鏡を用い、銀河を片っ端から観測、宇宙の膨張速度を精密測定
- 国立天文台、東京大学物理、IPMU、プリンストン大、他